

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**ANÁLISE VISCOELÁSTICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS  
QUENTES E MORNAS**

**Natália Guterres Mensch**

Porto Alegre  
2017

NATÁLIA GUTERRES MENSCH

**ANÁLISE VISCOELÁSTICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS  
QUENTES E MORNAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia

Porto Alegre  
2017

Mensch, Natália Guterres  
Análise viscoelástica de misturas asfálticas  
quentes e mornas / Natália Guterres Mensch. -- 2017.  
168 f.

Orientador: Jorge Augusto Pereira Ceratti.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-  
RS, 2017.

1. Viscoelasticidade. 2. Mistura asfáltica morna.  
3. Aditivo surfactante. 4. Módulo dinâmico. I.  
Ceratti, Jorge Augusto Pereira , orient. II. Título.

**NATÁLIA GUTERRES MENSCH**

**ANÁLISE VISCOELÁSTICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS  
QUENTES E MORNAS**

Esta dissertação de mestrado foi julgado adequado para a continuidade do projeto de dissertação e foi aprovado pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 28 de março de 2017

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti  
DSc. pela COOPE/UFRJ  
Orientador

Prof. Carlos Torres Formoso  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito (PUCRS)  
PhD pela University of Nottingham

Profa. Liédi Légi Bariani Bernucci (EPUSP)  
Dra. pela EPUSP



Dedico este trabalho a minha família: Rogério, Ivete e Leonardo, por todo o amor e ensinamentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer a todos que auxiliariam na minha formação acadêmica e profissional. Sem vocês eu não seria o que eu sou hoje! Agradeço também aos meus pais, que foram os maiores apoiadores e incentivadores dos meus estudos, bem como, financiadores de todas essas atividades. Vocês são grandes exemplos pra mim de amor e sabedoria.

Ao Professor Jorge Ceratti, orientador dessa dissertação, por toda a oportunidade, incentivo e confiança na realização dessa pesquisa.

Ao Professor Lélío Brito, que desempenhou inúmeras vezes o papel de co-orientador, sempre dividindo e auxiliando com seu conhecimento, também servindo sempre como um exemplo de profissional e bom professor, me incentivando ao interesse pela pavimentação asfáltica.

A toda a equipe do LAPAV. Os técnicos: Rodrigo Silva e Mateus Freitas pelo auxílio no desenvolvimento dos ensaios. Aos bolsistas: Kethelin Klagenberg pelo apoio incondicional, ao Daniel Fernandes pela sua disposição em sempre auxiliar, e ao nosso nerd Felipe Pivetta que auxílio nas tarefas de análise de dados. Bem como aos demais: Dionísio Doering, Bernadette, Marlova Johnston, Gracieli Colpo, Douglas Mocelin, Cynthia Blank, Douglas Engelke, Eduarda Fontoura, Filipe Reis, Guilherme Lopes, Gustavo Fermino e Junior Vicenzi pelo amparo e amizade durante a realização dos ensaios. As colegas de mestrado Jéssica Flesch, Marina Bortolotto e a Luiza Godoi pelo companheirismo durante todo o período.

A Paula, por aguentar todo o mau humor diariamente, por dar suporte e me escutar sempre que necessário, e também por sempre apoiar e incentivar muitas horas de estudo. Você foi muito importante pra mim nesta etapa. A Janine, por dar todo o suporte, auxílio e amor durante esta jornada em Porto Alegre. A Fernanda por toda a sabedoria compartilhada.

Aos fornecedores de ligantes e agregados dessa pesquisa, a Greca asfaltos, Betunel e Concepa. A MWV e ao programa PETER/CONCEPA pela auxílio com bolsa de pesquisa.

A Deus por sempre estar me protegendo e auxiliando na escolha do caminho certo.

"Se seus sonhos estiverem nas nuvens, não se preocupe,  
pois eles estão no lugar certo; agora construa os alicerces"

*Dalai Lama*

## RESUMO

MENSCH, N. G. Análise viscoelástica de misturas asfálticas quentes e mornas. 2017. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A caracterização das propriedades visco-elástico-plásticas dos materiais asfálticos são importantes para uma melhor compreensão do comportamento mecânico e performance de pavimentos. O módulo complexo visa caracterizar as propriedades viscoelásticas lineares do material presente no campo das pequenas deformações. O ensaio para obtenção do módulo dinâmico pode ser realizado a partir de um carregamento senoidal uniaxial de compressão com frequências que podem variar de 0,1Hz a 25Hz e com temperaturas de -10°C a 54°C. O valor absoluto do módulo complexo é conhecido como módulo dinâmico  $|E^*|$ , que pode ser definido como uma relação entre a amplitude de tensão e a amplitude de deformação. Já, a defasagem entre a tensão e a deformação é conhecida como ângulo de fase, que é um indicador das propriedades viscosas do material. Esta dissertação possuiu como objetivo caracterizar as propriedades viscoelásticas das misturas asfálticas quentes e mornas comumente utilizadas no Rio Grande do Sul, utilizando um aditivo surfactante para as misturas mornas. Para tanto foram dosadas 4 misturas asfálticas com agregados basálticos e os ligantes CAP 50/70, AMP 60/85, AB8 e CAP TLA e obtidos os parâmetros de adesividade e resistência dessas misturas quentes e mornas. Para a realização do ensaio de módulo dinâmico foi realizado uma revisão bibliográfica sobre os procedimentos de ensaio e análise de dados, posteriormente, foi adotada a metodologia adequada para os ensaios. Os mesmos foram realizados utilizando uma prensa universal MTS e a análise dos dados foi realizada com o auxílio das ferramentas do Microsoft Excel. Através do estudo foi possível concluir que as misturas com ligante convencional possuem um comportamento similar entre a mistura convencional e a morna. O mesmo não ocorre nas misturas com ligante modificado, onde ocorre uma alteração tanto da fase viscosa como da elástica, sendo esse efeito mais predominante nas misturas modificadas por polímero.

**Palavras-chave:** *viscoelasticidade, mistura asfáltica morna, aditivo surfactante, módulo dinâmico.*

## ABSTRACT

MENSCH, N. G. Análise viscoelástica de misturas asfálticas quentes e mornas. 2017. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The characterization of the viscoelastic-plastic properties of asphaltic materials are important for a better understanding of the pavements' mechanical behavior and performance. The complex module aims to characterize as linear viscoelastic properties of the material present in the field of small deformations. The assay for obtaining the dynamic modulus can be performed from a compression uniaxial sinusoidal loading with frequencies ranging from 0.1Hz to 25Hz and temperatures from -10 °C to 54 °C. The absolute value of the complex modulus is known as dynamic module  $|E^*|$ , which is defined as a relation between a stress amplitude and a strain amplitude. Already, a discrepancy between stress and strain is known as phase angle, which is an indicator of the viscous properties of the material. This dissertation aimed to characterize as viscoelastic properties of hot and warm asphalt mixtures commonly used in Rio Grande do Sul, using a surfactant additive for warm mixtures. In order to do so, four asphalt concrete mixes - composed with the basalt aggregates and binders CAP 50/70, AMP 60/85, AB 8 and CAP TLA – were designed. In addition, the parameters of adhesiveness and resistance to hot and warm mixtures were obtained. For a dynamic modulus test, a literature review was performed about the data analysis and test procedure, and a suitable methodology for testing was subsequently adopted. The tests were realized with an universal testing machine of MTS and the data analysis were performed by means of the Microsoft Excel tools. Through the study it was possible to conclude that mixtures with conventional binder presented similar behavior between a conventional and a warm mixture. The same does not occur in mixtures with modified binder, where a change in both the viscous and the elastic phases occurs, and this effect is more predominant in the polymer modified mixtures.

**Key-words:** *viscoelasticity, warm asphalt mixture, surfactant additive, dynamic modulus.*

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1. PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	23
1.2. OBJETIVOS .....	23
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	25
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>26</b>
2.1. VISCOELASTICIDADE EM MATERIAIS ASFÁLTICOS .....	26
2.2. MÓDULO COMPLEXO .....	31
2.2.1. Conceptualização .....	32
2.2.2. Ensaio de módulo dinâmico .....	35
2.2.2.1. Tipos de ensaios para determinação do módulo dinâmico .....	35
2.2.2.2. Normatização do ensaio de módulo dinâmico.....	38
2.2.2.3. Fatores importantes sobre o ensaio .....	41
2.2.3. Análise dos dados do ensaio de módulo dinâmico .....	45
2.2.3.1. Curva Mestra.....	45
2.2.3.2. Espaço de Black.....	49
2.2.3.3. Curvas isotérmicas .....	49
2.2.3.4. Curvas isócronas .....	50
2.2.3.5. Representação Cole-Cole .....	51
2.2.3.6. Inferência a fadiga e deformação permanente .....	51
2.2.4. Relação do ligante asfáltico e o módulo dinâmico .....	52
2.3. MISTURAS MORNAS .....	53
2.3.1. Aditivo surfactante .....	56
<b>3. EQUIPAMENTOS, MÉTODOS E MATERIAIS UTILIZADOS.....</b>	<b>58</b>
3.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	58
3.2. EQUIPAMENTO UTILIZADO .....	59
3.2.1. MTS 810 .....	59
3.2.2. Sensores de deslocamento .....	61
3.3. MATERIAIS .....	61
3.3.1. Agregado mineral.....	61
3.3.2. Cimentos asfálticos de petróleo .....	63

3.3.3.	Aditivo surfactante .....	64
3.4.	MÉTODOS.....	65
3.4.1.	Temperaturas de mistura e compactação .....	65
3.4.2.	Composição granulométrica .....	65
3.4.3.	Dosagem Marshall .....	65
3.4.4.	Resistência a tração por compressão diametral.....	66
3.4.5.	Módulo de resiliência .....	68
3.4.6.	Dano por umidade induzida.....	70
3.4.7.	Ensaio de módulo dinâmico .....	70
3.4.7.1.	Moldagem das Amostras .....	71
3.4.7.2.	Procedimento de ensaio.....	72
3.4.7.3.	Análise dos dados.....	76
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES.....</b>	<b>82</b>
4.1.	TEMPERATURAS DE MISTURA E COMPACTAÇÃO .....	82
4.2.	LIGANTES ASFÁLTICOS .....	82
4.3.	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA .....	84
4.4.	DOSAGEM MARSHALL .....	85
4.5.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	86
4.6.	MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	87
4.7.	DANO POR UMIDADE INDUZIDA .....	88
4.8.	ENSAIO DE MÓDULO DINÂMICO .....	89
4.8.1.	Propriedades volumétricas das amostras.....	89
4.8.2.	Módulo dinâmico e ângulo de fase .....	90
4.8.2.1.	Espaço de Black.....	91
4.8.2.2.	Plano Cole-Cole.....	94
4.8.2.3.	Curva mestra do módulo dinâmico .....	97
4.8.2.4.	Curva mestra do ângulo de fase.....	103
4.8.2.5.	Inferência a fadiga e deformação permanente .....	108
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>110</b>
5.1.	CONCLUSÕES.....	110
5.2.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	111

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>113</b>
APÊNDICE 1.....	119
APÊNDICE 2.....	154
APÊNDICE 3.....	159
APÊNDICE 4.....	164



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Organograma das misturas asfálticas .....	24
Figura 2: Fenômeno da fluência de um material viscoelástico .....	26
Figura 3: Fenômeno da relaxação de um material viscoelástico .....	27
Figura 4: Comportamento típico de materiais viscoelásticos sob cargas senoidais. ....	27
Figura 5: Reposta de um material viscoelástico sob tensão controlada .....	28
Figura 6: Domínio típico do comportamento observado em misturas asfálticas. ....	28
Figura 7: Elementos físico-matemáticos .....	29
Figura 8: Líquido de Maxwell .....	29
Figura 9: Sólido de Kelvin .....	30
Figura 10: Curva de fluência e recuperação dos elementos de Maxwell e Kevin .....	30
Figura 11: Carregamento senoidal .....	33
Figura 12: Representação esquemática do módulo complexo no plano complexo .....	34
Figura 13: Curva mestra para misturas com diferentes volumes de vazios .....	43
Figura 14: Amostras instrumentadas no equipamento .....	44
Figura 15: Obtenção dos parâmetros para curva mestra. ....	46
Figura 16: Translação gráfica das curvas isotérmicas .....	48
Figura 17: Curva do Espaço de Black .....	49
Figura 18: Curvas isotérmicas do módulo complexo. ....	50
Figura 19: Representação do módulo dinâmico na curva isócrona. ....	50
Figura 20: Representação do módulo complexo no plano cole-cole. ....	51
Figura 21: Classificação do asfalto pela temperatura de mistura .....	55
Figura 22: Curva mestra das misturas asfálticas preparadas em laboratório .....	56
Figura 23: Curvas mestras do módulo dinâmico, St. Louis, Missouri .....	57
Figura 24: Componentes do equipamento .....	60
Figura 25: Sensores de deslocamento .....	61
Figura 26: Agregados pétreos utilizados na pesquisa .....	62
Figura 27: Curva granulométrica dos agregados .....	63
Figura 28: Procedimento de adição do aditivo surfactante. ....	64
Figura 29: Compactador Marshall .....	66
Figura 30: Esquema de carregamento e plano de ruptura típica no ensaio de RT .....	67
Figura 31: Prensa para ensaio de RT .....	68
Figura 32: Equipamento para ensaio de MR .....	69

Figura 33: Compactador giratório Superpave .....	71
Figura 34: Condicionamento do corpo de prova .....	73
Figura 35: Amostra instalada.....	74
Figura 36: Sinal de força e deslocamento antes do ajuste PID.....	75
Figura 37: Sinal de força e erro da força após do ajuste PID .....	75
Figura 38: Sinal de tensão e deformação sem filtro.....	76
Figura 39: Sinal de tensão e deformação com filtro de média móvel.....	76
Figura 40: Sinal de tensão e deformação sem filtro.....	77
Figura 41: Sinal de tensão e deformação com filtro de média móvel.....	77
Figura 42: Sinal de tensão e deformação .....	80
Figura 43: Sinal de tensão e deformação manipulados.....	80
Figura 44: Viscosidade dos ligantes asfálticos .....	83
Figura 45: Faixa granulométrica utilizadas com AMP 60/85 e CAP TLA (Faixa C – DNIT) 84	
Figura 46: Faixa granulométrica utilizadas com CAP 50/70 (Faixa C – DNIT).....	84
Figura 47: Faixa granulométrica utilizadas com AB8 (Gap graded– DNIT).....	85
Figura 48: Resistência à tração por compressão diametral das misturas no teor de projeto ....	87
Figura 49: Módulo de resiliência das misturas no teor de projeto.....	88
Figura 50: Resistência à tração retida no ensaio de dano por umidade induzida .....	88
Figura 51: Espaço de Black para as misturas com AB8 .....	92
Figura 52: Espaço de Black para as misturas com AMP 60/85 .....	92
Figura 53: Espaço de Black para as misturas com CAP 50/70 .....	93
Figura 54: Espaço de Black para as misturas com CAP TLA.....	93
Figura 55: Espaço de Black para todas as misturas .....	94
Figura 56: Plano Cole-cole para as misturas com AB8 .....	95
Figura 57: Plano Cole-cole para as misturas com AMP 60/85 .....	95
Figura 58: Plano Cole-cole para as misturas com CAP 50/70 .....	96
Figura 59: Plano Cole-cole para as misturas com CAP TLA.....	96
Figura 60: Plano Cole-cole para as todas as misturas.....	97
Figura 61: Curva mestra para as misturas com AB8 .....	98
Figura 62: Curva mestra para as misturas com AMP 60/85 .....	98
Figura 63: Curva mestra para as misturas com CAP 50/70 .....	99
Figura 64: Curva mestra para as misturas com CAP TLA.....	99
Figura 65: Curva mestra para todas as misturas .....	100
Figura 66: Curva mestra para todas as misturas nas altas frequências .....	101

Figura 67: Curva mestra para todas as misturas nas médias frequências .....	101
Figura 68: Curva mestra para todas as misturas nas baixas frequências .....	102
Figura 69: Curva mestra do ângulo de fase para as misturas com AB8 .....	103
Figura 70: Curva mestra do ângulo de fase para as misturas com AMP 60/85.....	104
Figura 71: Curva mestra do ângulo de fase para as misturas com CAP 50/70 .....	104
Figura 72: Curva mestra do ângulo de fase para as misturas com CAP TLA.....	105
Figura 73: Curva mestra do ângulo de fase para todas as misturas .....	105
Figura 74: Curva mestra do ângulo de fase nas altas frequências .....	106
Figura 75: Curva mestra do ângulo de fase na frequência média.....	107
Figura 76: Curva mestra do ângulo de fase nas baixas frequências .....	107
Figura 77: Inferência a fadiga para todas as misturas na temperatura de 21°C .....	108
Figura 78: Inferência a deformação permanente para todas as misturas na temperatura de 54°C .....	109
.....	109
Figura 79: Inferência a deformação permanente para todas as misturas na temperatura de 37°C .....	109
.....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores de massa e forma para diferentes amostras e condições de carregamento ..	37
Tabela 2: Comparativo entre as normas para o ensaio de módulo complexo. ....	38
Tabela 3: Tempo de equilíbrio recomendado. ....	39
Tabela 4: Níveis de tensão típicos. ....	40
Tabela 5: Número de ciclos para a sequência de ensaios. ....	40
Tabela 6: Propriedades dos agregados .....	62
Tabela 7: Valores médios das análises granulométricas dos agregados .....	63
Tabela 8: Normativas utilizadas na determinação das propriedades dos cimentos asfálticos .	64
Tabela 9: Calibração da estufa em Dezembro de 2016. ....	73
Tabela 10: Temperatura do agregado, ligante e compactação .....	82
Tabela 11: Propriedades dos cimentos asfálticos .....	83
Tabela 12: Porcentagem de agregado em cada mistura .....	85
Tabela 13: Resultados da dosagem com AMP 60/85, CAP TLA e CAP 50/70. ....	85
Tabela 14: Resultados da dosagem com AB8 .....	86
Tabela 15: Propriedades volumétricas das amostras .....	90
Tabela 16: Parâmetros de ajuste do modelo sigmoidal. ....	102

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$\hat{\varepsilon}'_i$  : deformação prevista durante o ensaio no ponto i

$\varepsilon^*$  : deformação complexa

$\varepsilon'_i$  : deformação corrigida pela regressão no ponto i

$\sigma^*$  : tensão complexa

$\sigma'_i$  : tensão corrigida pela regressão no ponto i

$\hat{\sigma}'_i$  : tensão prevista durante o ensaio no ponto i

|E\*|: Módulo dinâmico

|E\*|calc : módulo dinâmico calculado pelo ajuste do modelo sigmoidal

|E\*|exp : módulo dinâmico obtido experimentalmente

°C: graus Celsius

$\mu$  : fator de massa nos ensaios de módulo dinâmico não homogêneos

$\mu$ : coeficiente de Poisson

AASHTO: *American Association of Highway and Transportation Officials*

AB: Cimento asfáltico modificado com borracha de pneu moída e outros aditivos

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AMP: Asfalto modificado por polímero

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

$C_1$  e  $C_2$ : constantes dependentes do material para modelo WLF

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ: Concreto betuminoso usinado a quente

CNT: Confederação Nacional de Transportes

cP: centipoise

CP: Corpo de prova

D: diâmetro do CP

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

$\varepsilon$ : deformação

E: módulo de elasticidade

$\varepsilon_0$ : amplitude da deformação

$E_1$  ou  $E'$ : Módulo elástico ou de armazenamento

$\varepsilon_1$ : deformação no ponto 1

$E_2$  ou  $E''$ : Módulo viscoso ou módulo de perda

$\epsilon_2$ : deformação no ponto 2

EN: *European Standard*

$E_{ref}$ : módulo de referencia

ES: Especificação de serviço

f = frequência de carregamento

F: coeficiente de viscosidade

$f_R$  : frequência reduzida

H = altura do corpo de prova (cm)

HMA: *hot mix asphalt*

Hz: Hertz

i = número imaginário ( $= \sqrt{-1}$ )

LAPAV: Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LVDT: *Linear Variable Differential Transducer*

M : massa da amostra

m : massa das partes móveis

ME: Método de ensaio

mm: milímetros

Mn/DOT: *Minnesota Department of Transportation*

MPa: Megapascal

MPT: *MultiPurpose TestWare*®

MR: Módulo de resiliência

MR: módulo de resiliência

MTS: *Material Testing System*

MWV: MeadWestvaco®

n = número de pontos total em análise

N: número de ciclos

NBR: Norma brasileira

NCHRP: *National Cooperative Highway Research Program*

P : carga vertical aplicada

$p_{200}$  : porcentagem passante na peneira nº 200

$p_{34}$  : porcentagem passante na peneira 3/4"

$p_{38}$  : porcentagem passante na peneira 3/8"

$p_4$  : porcentagem passante na peneira nº 4

PID: *Proportional–integral–derivative*

$P_{rup}$  : Carga de compressão de ruptura (N)  
 $R$  : constante universal dos gases (8,31J/mole/°K)  
 $R^2$  : coeficiente de determinação  
REFAP: Refinaria Alberto Pasqualini  
RRT: Resistência retida a tração  
RSC: *Remote Station Control*  
RT: Resistência a tração  
RTFOT: *Rolling Thin Film Oven Test*  
 $se(\epsilon)$  : desvio padrão da deformação  
 $se(\sigma)$  : desvio padrão da tensão  
SSE : somatório dos erros quadráticos  
T : temperatura  
t: tempo  
 $t_0$  tempo inicial  
 $t_1$  tempo final  
 $t_i$  = fração do tempo entre os picos de tensão e deformação;  
TLA: *Trinidad Lake Asphalt*  
 $t_p$  : tempo de um ciclo de carga.  
 $T_R$  : temperatura de referência  
UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
 $V_{beff}$  : porcentagem de ligante em volume efetivo  
 $V_v$  : volume de vazios  
WLF: Williams, Landel e Ferry  
WMA: *Warm mix asphalt*  
z : deslocamento;  
 $\alpha$  : intervalo do valor do módulo  
 $\alpha(T)$ : fator de deslocamento  
 $\beta$  : angularidade  
 $\gamma$  : fator de forma nos ensaios de módulo dinâmico não homogêneos  
 $\Delta$  : deformação elástica ou resiliente  
 $\delta$  : valor mínimo do módulo;  
 $\delta H$  : energia aparente de ativação característica do material  
 $\Delta t$  : diferença de tempo entre os picos de tensão e deformação  
 $\epsilon(t)$ : deformação em função do tempo  
 $\epsilon_0$ : amplitude da deformação

$\eta$ : viscosidade em  $10^6$  poise

$\pi$  : fase do sinal

$\rho$  : deslocamento vertical

$\sigma(t)$ : tensão em função do tempo

$\sigma_0$ = amplitude da tensão

$\sigma_R$  = tensão de tração

$\varphi$ : ângulo de fase

$\omega$  = velocidade angular



## 1. INTRODUÇÃO

No cenário atual brasileiro as rodovias são de suma importância para a economia nacional, pois é o principal responsável por movimentar a cadeia produtiva do nacional, além de facilitar o escoamento das produções tanto da pecuária, agricultura, indústria de bens e serviços, entre outros. Apesar disto, as rodovias brasileiras são em sua grande maioria de baixo conforto ao rolamento, conforme pesquisas recorrentes da Confederação Nacional de Transportes (CNT).

O pavimento é formado por um sistema de multicamadas de espessuras finitas, que tem como função resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, bem como, proporcionar condições adequadas de trafegabilidade aos seus usuários. O revestimento asfáltico é formado por uma mistura de ligante asfáltico e agregados, e tem como objetivo resistir diretamente à ação do tráfego e de transferir o carregamento de forma atenuada as camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de conforto e segurança.

Com a crescente preocupação ambiental o setor rodoviário observou a necessidade de atividades que visem diminuir a temperatura de usinagem e compactação das misturas asfálticas, de forma que haja a redução de emissões de poluentes e de consumo energético. Por estes motivos surgiram as misturas asfálticas mornas (em inglês, *warm mix asphalt* - WMA), cuja compactação é realizada com redução de temperatura da ordem de 30°C ou mais em relação às misturas quentes. Desta maneira, com o uso de misturas mornas visa-se ter comportamento similar ou superior ao das misturas a quente, sem poluir e com redução do consumo energético (Klinsky et al., 2014).

O aditivo químico do tipo surfactante possui tecnologia específica para misturas asfálticas mornas sem adição de água. Este aditivo permite reduzir a temperatura de mistura e de compactação das misturas asfálticas convencionais de 10°C até 30°C e é especialmente formulado pelos fabricantes para ser compatível com ligantes asfálticos convencionais e modificados por polímero ou pó de borracha de pneu.

A resistência é um importante parâmetro de dimensionamento dos pavimentos. Estudar a resistência das misturas asfálticas é um desafio baseado na dependência do clima (temperatura) e do tráfego (frequência de carregamento). Para caracterização de uma mistura asfáltica com

características parte elástica e parte viscosa é necessária uma análise em diferentes frequências e temperaturas que sejam representativas das condições encontradas em campo.

O material viscoelástico apresenta maior rigidez para carregamentos com menor duração de aplicação de pulso de carga e menor rigidez para carregamentos dinâmicos com maior duração, sendo a duração do pulso relacionada com a velocidade dos veículos. A temperatura possui uma grande influência na rigidez da mistura asfáltica, sendo que com o aumento da temperatura a rigidez diminui.

O dimensionamento dos pavimento é baseado no estado de tensão e deformações aplicadas no pavimento pelo tráfego, para se obter um parâmetro de transformação entre ambos é necessário o conhecimento do módulo das camadas do pavimento. Atualmente no Brasil a prática normatizada é a obtenção do módulo de misturas asfálticas através do ensaio de módulo de resiliência (DNER-ME 135/10 e NBR 16018/11), sendo este um módulo elástico que contabiliza as deformações recuperáveis. Este ensaio é realizado aplicando-se carga em um corpo de prova circular de modo que o mesmo gere uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação da carga. As medidas de deformações recuperáveis são realizadas diametralmente na direção horizontal. O ensaio deve ser realizado na frequência de 1 Hz, caso não haja especificação da temperatura a norma recomenda a utilização de  $25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

O módulo complexo pode ser usado para determinar as propriedades elásticas bem como as propriedades viscoelásticas do material. O ensaio consiste em realizar uma varredura dos valores de módulo dinâmico e ângulo de fase determinado em variadas temperaturas e frequências.

O módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) é o valor absoluto do módulo complexo, sendo este a relação entre as amplitudes de tensão e deformação. O módulo dinâmico visa contabilizar os efeitos da variação de temperatura e frequência. O mesmo pode ser obtido por meio de uma carregamento senoidal uniaxial de compressão em corpos de prova cilíndricos (ASTM D 3497/79 e AASHTO T 342/11). O mesmo é largamente utilizado no exterior no dimensionamento de pavimentos, sendo o mesmo utilizado como parâmetro para cálculo de tensões e deformações no método *2002 Design guide for new and rehabilitated pavements* da *American Association of State Highway Transportation Officials* (AASHTO).

O ângulo de fase, é um indicador das propriedades viscosa do material. Para um material puramente viscoso seu ângulo de fase é de  $90^\circ$  e para um material puramente elástico o ângulo de fase é de  $0^\circ$ .

### 1.1. PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

O modal rodoviário possui grande importância para a economia nacional. A maioria das rodovias com médio e alto volume de tráfego são pavimentadas com revestimento asfáltico. Diante disso a qualidade dos revestimentos asfálticos é de suma importância para a economia e para a sociedade brasileira.

O método atual de dimensionamento do pavimento no Brasil realiza uma previsão de comportamento elástica linear. Sobre tudo, sabe-se que o comportamento das misturas asfálticas é bem mais complexo, contando com parcelas viscosas e elásticas. A evolução do conhecimento do comportamento das misturas asfálticas em outros países já conta com análises viscoelásticas.

As misturas mornas se apresentam como uma solução de redução de emissão de poluentes e do consumo energético durante o processo de produção da mistura asfáltica. O estudo de suas propriedades viscoelásticas é importante para uma melhor compreensão do comportamento mecânico e performance do pavimento. Outros estudos com misturas mornas já foram realizados no Brasil, porém com relação a modificação do ligante asfáltico nas misturas mornas ainda há poucos estudos.

### 1.2. OBJETIVOS

Esta dissertação tem como objetivo geral caracterizar as propriedades viscoelásticas de quatro misturas asfálticas quentes e mornas utilizando um aditivo surfactante para as misturas mornas.

### 1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para se atingir o objetivo geral da pesquisa pretende-se avaliar, com ensaios de laboratório, os parâmetros de resistência das misturas asfálticas, sendo eles o módulo dinâmico e o ângulo de fase. Para tanto será utilizado quatro composições, as quais estão apresentadas no organograma da Figura 1. Para as misturas mornas foi utilizado um aditivo surfactante.

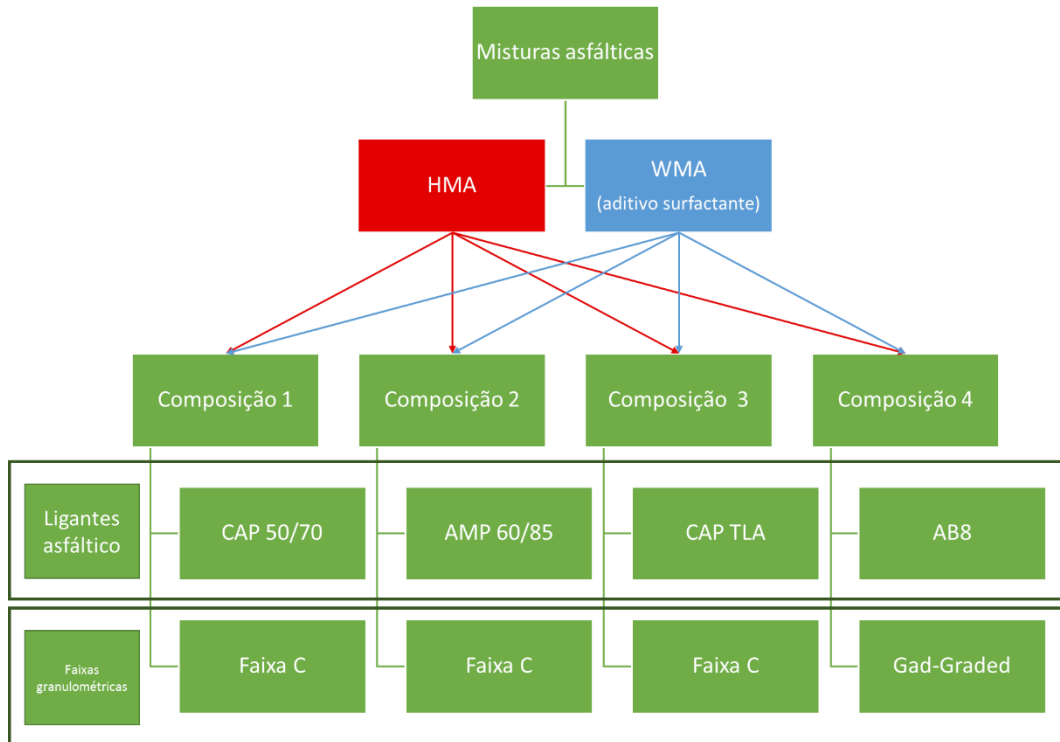


Figura 1: Organograma das misturas asfálticas

Devem ser adotados os seguintes procedimentos:

- Realizar uma revisão bibliográfica tendo como base literaturas nacionais e internacionais;
- Escolher metodologia adequada para a realização do ensaio de módulo complexo, tendo em vista diferentes normativas;
- Realizar adaptação do equipamento MTS do Laboratório de Pavimentação da UFRGS (LAPAV) para ser utilizado nos ensaios;
- Determinar o teor ótimo de ligante através do procedimento Marshall;
- Realizar ensaios de adesividade de dano por umidade induzida no teor ótimo com e sem aditivo;
- Obter o módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral de todas as misturas no teor ótimo;
- Realizar ensaios de módulo dinâmico nas misturas quentes e mornas;
- Determinar o módulo dinâmico e o ângulo de fase das misturas asfálticas;
- Analisar os dados produzindo como respostas:

- Curva mestra do módulo dinâmico;
- Curva mestra do ângulo de fase;
- Espaço de Black;
- Plano Cole-Cole;

j) Realizar a análise de inferência a fadiga e deformação permanente.

#### 1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No capítulo 1 do presente trabalho foi apresentado uma breve introdução à pesquisa, partindo da posição global do tema para a justificativa de estudo, procurando abordar sua relevância. Foram discriminados também os objetivos gerais e específicos da pesquisa.

A revisão bibliográfica necessária para a realização da pesquisa está disponibilizado no capítulo 2 que está dividido em nos assuntos centrais: viscoelasticidade em misturas asfálticas, módulo complexo e misturas mornas. Com este objetiva-se compreender as experiências e especificações técnicas nacionais e internacionais.

Sobre o equipamento, métodos e materiais empregados na pesquisa estão disponibilizados no capítulo 3. Além disso, esse descreve as misturas que estão sendo trabalhadas na dissertação, especifica as diferentes variáveis analisadas, bem como, os métodos aplicados na realização dos ensaios.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos do comprimento dos objetivos desta pesquisa, bem como, as análises pertinentes.

Já, o último capítulo visa apresentar as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados assuntos relevantes sobre o tema da pesquisa. É apresentado um assunto chave para o desenvolvimento desta pesquisa, que é a viscoelasticidade. São apresentados conceitos básicos utilizados para a caracterização de qualquer material viscoelástico, bem como, modelos bases utilizados na previsão do comportamento viscoelástico de misturas asfálticas.

Posteriormente é apresentado um item sobre módulo dinâmico, onde é dissertado sobre os conceitos envolvidos no ensaio, normativas e práticas de execução do ensaio, fatores relevantes no desenvolvimento do ensaio e análise de dados pertinente ao módulo dinâmico e ângulo de fase.

Por último o item de misturas mornas traz um resumo dos conceitos e importâncias dessa prática.

### 2.1. VISCOELASTICIDADE EM MATERIAIS ASFÁLTICOS

Os materiais asfálticos apresentam um comportamento mecânico dependente do tempo. Em outras palavras, eles exibem características tanto viscosas quanto elásticas quando submetido a deformações. O comportamento dependente do tempo de materiais asfáltico é manifestado através da fluência e relaxamento. Esses fenômenos são comuns a todos os materiais dependentes do tempo. Enquanto o termo fluência, também conhecido como *creep*, representa um aumento da deformação com o tempo sob uma carga constante (Figura 2), o relaxamento é a diminuição da tensão com o tempo, sob uma deformação constante (Figura 3) (Dongmo-Engeland, 2005; Jung, 2006 e Woldekiran, 2011 *apud* Melo, 2014).

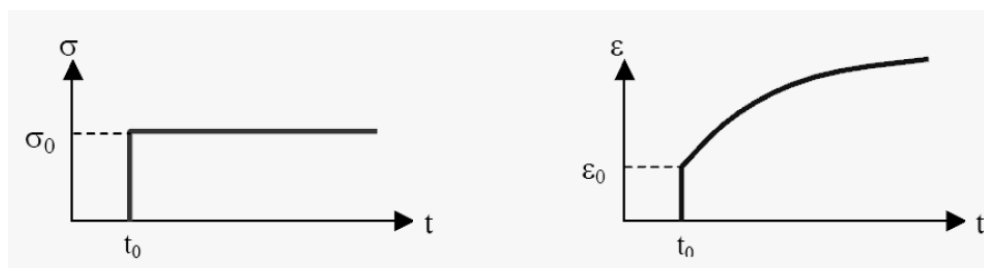


Figura 2: Fenômeno da fluência de um material viscoelástico

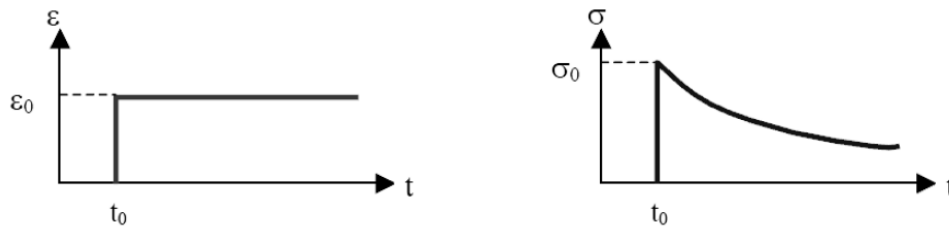


Figura 3: Fenômeno da relaxação de um material viscoelástico

Outra propriedade dos materiais viscoelástico lineares é a defasagem de pico. Quando um material viscoelástico linear é submetido a uma carga senoidal, a resposta do material também será senoidal, porém com pico de deformação defasado com relação ao pico de tensão por um período de tempo, conforme Figura 4. A relação entre essa defasagem e a frequência de carregamento é conhecido como ângulo de fase.

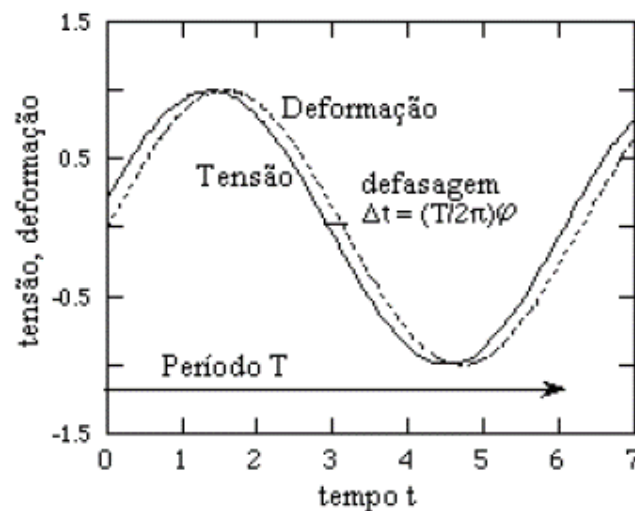


Figura 4: Comportamento típico de materiais viscoelásticos sob cargas senoidais.

FONTE: Theisen (2011)

Segundo Vinson e Hilton (2006), um material viscoelástico é definido como um material que não armazena totalmente a energia externa fornecida em forma de energia potencial interna (caso dos materiais elásticos), nem dissipa toda a energia fornecida (caso dos fluidos viscosos). Um material viscoelástico é um patamar intermediário entre um sólido elástico e um fluido viscoso, armazenando parcialmente a energia externa fornecida ou dissipando parcialmente a mesma, fazendo tais materiais terem um comportamento intermediário entre um sólido e um fluido (Theisen, 2011).

Quando um material viscoelástico é submetido a uma tensão constante ( $\sigma_0$ ), uma resposta instantânea da deformação ( $\epsilon_0$ ) é observada (Figura 5). Em seguida é verificado um aumento contínuo da deformação. Logo, se a carga for mantida durante um período mais longo, é observado que a deformação aumenta linearmente com o tempo. Quando a carga é removida ocorre uma recuperação instantânea elástica seguida de uma recuperação tardia. A deformação não recuperável é chamada de viscosa (Olard, 2003 e Woldekiran, 2011 *apud* Melo, 2014).

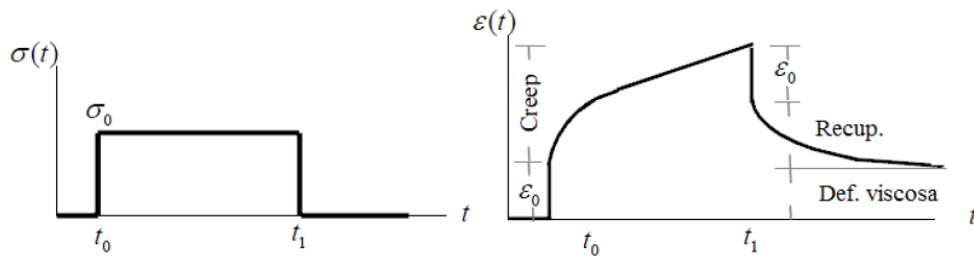


Figura 5: Resposta de um material viscoelástico sob tensão controlada

A Figura 6 apresenta o comportamento dos concretos asfálticos com diferentes níveis de sollicitação de deformação ( $\epsilon$ ) e números de ciclos ( $N$ ). É possível observar que carregamentos caracterizados por uma centena de ciclos e por deformações pequenas, o comportamento observado é viscoelástico linear.

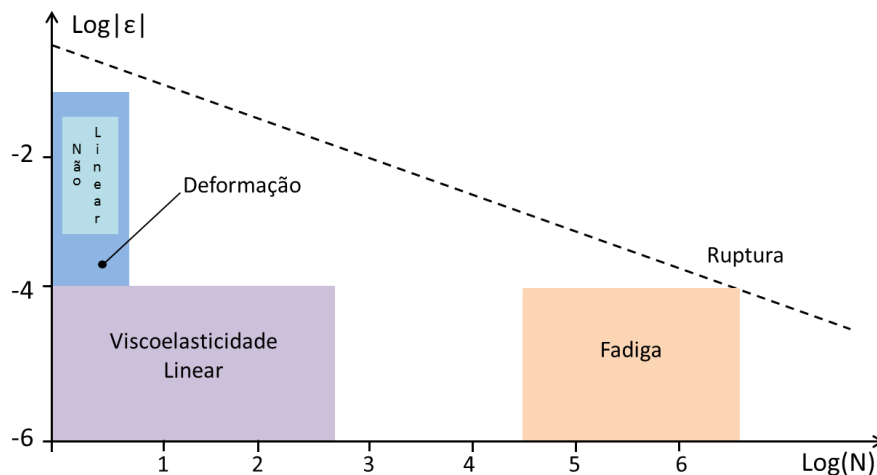


Figura 6: Domínio típico do comportamento observado em misturas asfálticas.

FONTE: Adaptado de Di Benedetto *et al.* (2001)

Os modelos físico-matemáticos para materiais viscoelásticos são a mola ou elemento de Hooke (representa a parcela elástica) e o amortecedor ou elemento de Newton (representa a parcela



viscosa). Na Figura 7 estão apresentados os elementos mola e amortecedor, onde  $\sigma$  é uma tensão normal aplicada.

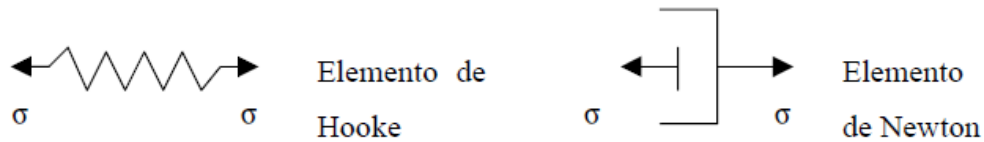


Figura 7: Elementos físico-matemáticos

Associando estes elementos em série ou paralelo é possível criar modelos mais complexos, que visam reproduzir a dependência da deformação em relação ao tempo. Cada um deles visa reproduzir propriedades como, fluência, relaxação, elasticidade, escoamento, entre outros. Segundo Monteiro (1984) *apud* Amaral (2000), um elemento de Hooke e um elemento de Newton, associados em série constituem o líquido de Maxwell ou elemento de Maxwell (Figura 8), criado para explicar a elasticidade dos líquidos. Também é possível associar em série de  $n$  elementos de Maxwell, formando o chamado modelo generalizado de Maxwell.

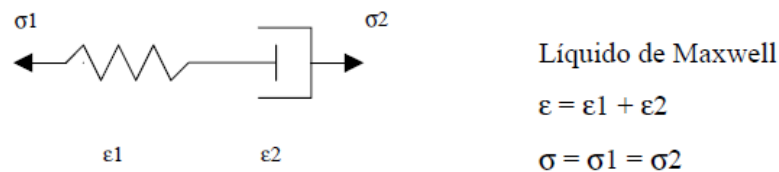


Figura 8: Líquido de Maxwell

Já o mesmo autor relata como uma associação em paralelo produz o sólido de Kelvin ou elemento de Kelvin (Figura 9), criado para explicar o fenômeno do amortecimento das oscilações devido ao chamado atrito interno nos sólidos. Assim como no elemento de Maxwell também é possível associar em série de  $n$  elementos de Kelvin, formando o modelo generalizado de Kelvin.

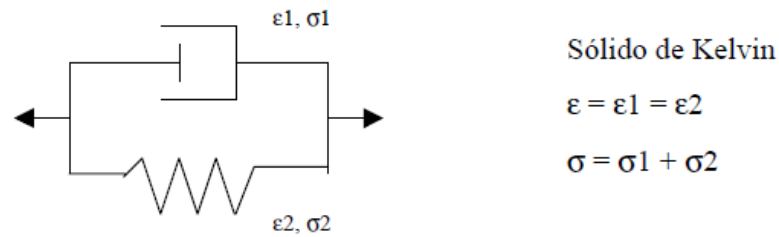


Figura 9: Sólido de Kelvin

A Figura 10 apresenta as curvas de fluência e de recuperação do elemento de Maxwell e do elemento de Kelvin, onde  $E$  é o módulo de elasticidade e  $F$  é o coeficiente de viscosidade.

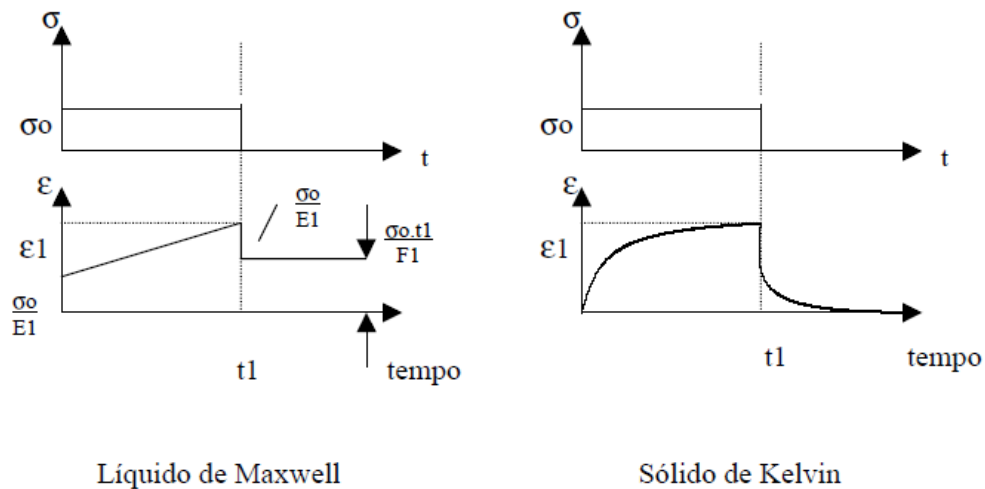


Figura 10: Curva de fluência e recuperação dos elementos de Maxwell e Kevin

Segundo Theisen (2004) e outros autores citados pelo mesmo (Barbosa, 1976; Gilson *et al.*, 2003; Abbas, 2004; Sousa, 2005), o modelo generalizado de Kelvin é o mais adequado para descrição da resposta de deformação de materiais viscoelásticos quando são submetidos a tensões, devido a resposta se assemelhar ao comportamento de fluência observado experimentalmente nesses materiais. Segundo o mesmo autor, algumas pesquisas tem caracterizado misturas asfálticas ou o mastique como uma série de elementos de Kelvin e/ou Maxwell ligados em série e/ou paralelo.

## 2.2. MÓDULO COMPLEXO

O ensaio de módulo complexo para misturas asfálticas não é um conceito novo. Em 1962, Papazian foi um dos primeiros a descrever ensaios viscoelásticos realizados em misturas asfálticas. Ele aplicou uma tensão senoidal a uma amostra cilíndrica em uma determinada frequência, e realizou medições da deformação na mesma frequência. Os testes foram realizados sob condições controladas de temperaturas em diferentes amplitudes de carga e frequência. Ele conclui que os conceitos de viscoelasticidade podem ser aplicados para dimensionamento e previsão de performance dos pavimentos (Clyne *et al.*, 2003).

O Programa Nacional de Pesquisa Rodoviária Cooperativa (em inglês *National Cooperative Highway Research Program*, sigla NCHRP) no projeto 1-37<sup>a</sup> (Desenvolvimento do Guia de 2002 para projeto de novos e reabilitação de estruturas pavimentadas: Parte II) é o responsável pelo desenvolvimento do Guia de AASHTO 2002 para a projeto de estruturas de pavimentos. Este guia recomenda a utilização do módulo dinâmico como um parâmetro de rigidez no processo de dimensionamento mecânico.

Witczak e Fonseca propuseram um modelo empírico para prever o módulo complexo de uma mistura asfáltica. O modelo foi gerado a partir de uma base de dados que consiste em 1429 pontos de 149 misturas a partir das curvas mestras das mesmas. Posteriormente o modelo passou por algumas recalibrações com novos dados de ensaios, ficando conforme Equação 1.

$$\begin{aligned} \log |E^*| = & -1,249937 + 0,029293(p_{200}) - 0,001767(p_{200})^2 - 0,002841(p_4) \\ & - 0,058097(V_v) - 0,0802208 \times \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_v} \\ & + \frac{3,871977 - 0,0021 \times p_4 + 0,003958 \times p_{38} - 0,000017(p_{38})^2 + 0,005470 p_{34}}{1 + e^{(-0,603313 - 0,31335 \log(f) - 0,393532 \log(\eta))}} \end{aligned} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$p_{200}$  = porcentagem passante na peneira nº 200;

$p_4$  = porcentagem passante na peneira nº 4;

$p_{34}$  = porcentagem passante na peneira 3/4”;

$p_{38}$  = porcentagem passante na peneira 3/8”;

$f$  = frequência de carregamento;

$V_{\text{beff}}$  = porcentagem de ligante em volume efetivo;

$V_v$  = volume de vazios;

$\eta$  = viscosidade em  $10^6$  poise;

$|E^*|$  = módulo dinâmico em psi.

Uma das principais vantagens dessa equação é a possibilidade de prever o valor do módulo dinâmico em situações extremas, ou seja, em temperaturas muito altas ou muito baixas. Essa capacidade está ligada ao formato sigmoidal da formulação (Mello, 2008).

No estudo de Clyne *et al.* (2003) foram analisadas misturas asfálticas do banco de dados Departamento de Transportes de Minnesota (*Minnesota Department of Transportation - Mn/DOT*) através de resultados reais de módulos complexos e dos obtidos pela Equação 1. Foi possível observar que para algumas misturas o ajuste de dados foi relativamente bem sucedido para as temperaturas intermediárias e baixas, já nas temperaturas altas os resultados obtidos pelas equações de previsões tendem a se afastar dos dados do teste. Já, para as outras misturas as equações de previsão tendem a se afastar dos dados do teste. Em geral, os autores observaram que os resultados da equação possuem valores superiores dos obtidos em ensaios de módulo dinâmico.

### 2.2.1. Conceptualização

As misturas asfálticas possuem propriedades elásticas, viscosas e plásticas, sendo que no campo das pequenas deformações são apresentadas somente as propriedades viscoelásticas. O módulo complexo visa caracterizar as propriedades viscoelásticas lineares do material, bem como contabilizar os efeitos de diferentes climas e tráfegos, através da variação de temperatura e frequência do ensaio.

O ensaio para obtenção do módulo complexo é realizado para um carregamento senoidal uniaxial de compressão com frequências que podem variar de 0,1 Hz a 25 Hz e com temperaturas de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $54^{\circ}\text{C}$  segundo a norma da AASHTO 342/11. No ensaio se obtém como resposta a deformação em forma senoidal, conforme Figura 11.

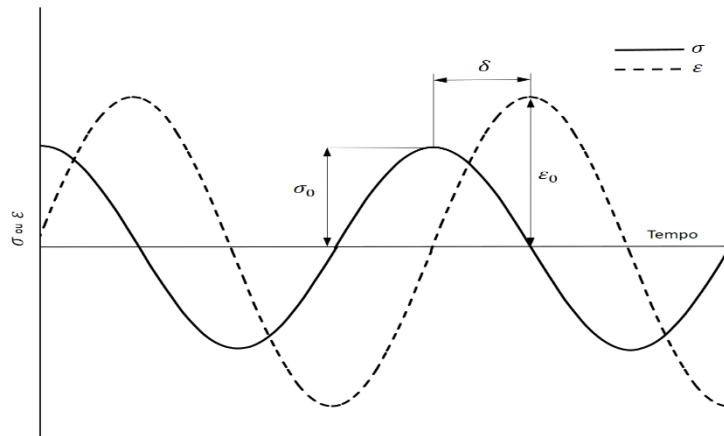


Figura 11: Carregamento senoidal

Como o comportamento das misturas asfálticas são dependentes do tempo é comum aplicar a teoria da viscoelasticidade para a análise em sistemas de camadas. A matemática complexa proporciona uma ferramenta matemática que auxilia na resolução do comportamento viscoelástico das misturas asfálticas em carregamentos cíclicos. O carregamento senoidal uniaxial (Equação 2) pode ser representada da forma complexa (Kim, 2009):

$$\sigma^* = \sigma_0 \cos(\omega t) + i\sigma_0 \sin(\omega t) = \sigma_0 e^{i\omega t} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$\sigma_0$  = amplitude da tensão

$\omega$  = velocidade angular, a qual é relacionada com a frequência pela Equação 3.

$$f = 2\pi\omega \quad \text{Equação 3}$$

Sendo a resposta a deformação conforme Equação 4.

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \varphi)} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$\varepsilon_0$  = amplitude da deformação

$\varphi$  = ângulo de fase.

$i$  = número imaginário ( $= \sqrt{-1}$ )

O valor absoluto do módulo complexo é conhecido como módulo dinâmico  $|E^*|$ , que pode ser definido como a relação entre a amplitude de tensão e a amplitude de deformação conforme Equação 5.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad \text{Equação 5}$$

O módulo complexo pode ser dividido em duas partes, sendo uma delas a parte real que representa o módulo elástico ou de armazenamento ( $E_1$  ou  $E'$ ), e a parte imaginária que corresponde ao módulo viscoso ou módulo de perda ( $E_2$  ou  $E''$ ), os dois podem ser representados no plano complexo conforme Figura 12. Os módulos  $E_1$  e  $E_2$  podem ser representados como uma função do ângulo de fase conforme a Equação 6 e Equação 7.

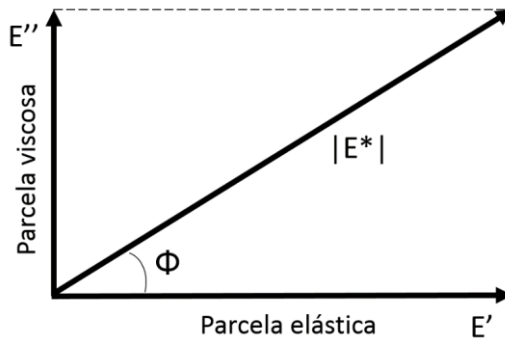


Figura 12: Representação esquemática do módulo complexo no plano complexo

Fonte: Adaptado de Pazos ( 2015)

$$E_1 = \frac{\sigma_0 \cos \varphi}{\varepsilon_0} \quad \text{Equação 6}$$

$$E_2 = \frac{\sigma_0 \sin \varphi}{\varepsilon_0} \quad \text{Equação 7}$$

O ângulo de fase pode ser definido como um indicador das propriedades viscosas do material ensaiado, podendo ser representado como o ângulo de defasagem de  $\varepsilon_0$  em relação a  $\sigma_0$  (Centofante, 2016), conforme Equação 8.

$$\varphi = \frac{t_i}{t_p} \times 360 = \omega \times \Delta t \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$t_i$  = fração do tempo entre os picos de tensão e deformação;

$t_p$  = tempo de um ciclo de carga.

$\omega$  = frequência angular

$\Delta t$  = diferença de tempo entre os picos de tensão e deformação

O ângulo de fase pode ser determinado também como a tangente dos módulos de armazenamento e perda (Equação 9). Segundo Lakes (1998) *apud* Theisen (2011) a  $\tan(\varphi)$  pode ser definida como a relação do atrito interno ou amortecimento mecânico.

$$\tan \varphi = \frac{E_2}{E_1} \quad \text{Equação 9}$$

Se o material é puramente elástico o ângulo de fase é igual a zero, pois não há dissipação da energia. Já se o mesmo for igual a  $90^\circ$  o material é puramente viscoso, não existe armazenagem de energia.

## 2.2.2. Ensaio de módulo dinâmico

O tema dessa dissertação não inclui avaliar as variáveis existentes no ensaio de módulo complexo. Porém, como o ensaio foi pela primeira vez realizado no Laboratório de Pavimentação da UFRGS, foi necessário um estudo sobre a realização do ensaio e parâmetros importantes. Estes itens estão apresentados a seguir.

### 2.2.2.1. Tipos de ensaios para determinação do módulo dinâmico

Os ensaios de módulo dinâmico podem ser divididos em duas categorias: os homogêneos e os não homogêneos. Os ensaios homogêneos são aqueles para os quais pode-se ter acesso direto das tensão e deformações, já os não homogêneos são os que necessitam considerar a estrutura geométrica do corpo de prova (Di Benedetto, 1990 *apud* Momm, 1998).

Os fatores utilizados para módulos não homogêneos são o fator de forma e o fator de massa. O fator de forma ( $\gamma$ ) depende das dimensões do corpo de prova, já o fator de massa ( $\mu$ ) é uma função da massa da amostra ( $M$ ) e da massa das partes móveis ( $m$ ) que influenciam a força resultante pelos seus efeitos de inerciais. Desta forma, as duas componentes são inseridas nos

valores do módulo conforme a Equação 10 Equação 11. Já a Tabela 1 apresenta os fatores de forma e massa.

$$E_1 = \gamma \left( \frac{P}{z} \times \cos \varphi \times \frac{\mu}{10^3} \times \omega^2 \right) \quad \text{Equação 10}$$

$$E_2 = \gamma \left( \frac{P}{z} \times \sin \varphi \right) \quad \text{Equação 11}$$

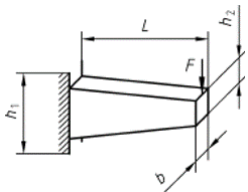
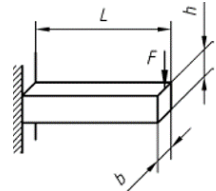
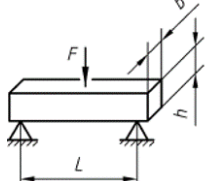
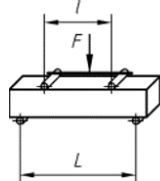
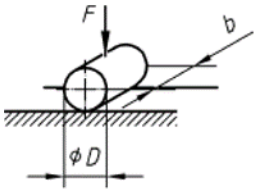
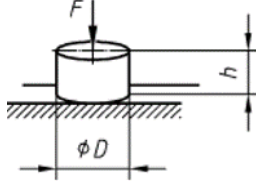
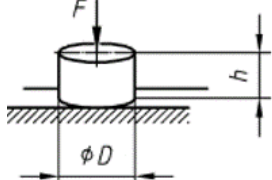
Onde:

P = força aplicada;

z = deslocamento;



Tabela 1: Fatores de massa e forma para diferentes amostras e condições de carregamento

Tipo de carregamento		Fator de forma ( $\gamma$ )	Fator de massa ( $\mu$ )
Viga dois pontos para amostras trapezoidais		$\frac{12L^3}{b(h_1 - h_2)^3} \left[ \left( 2 - \frac{h_2}{2h_1} \right) \frac{h_2}{h_1} - \frac{3}{2} - \ln \frac{h_2}{h_1} \right]$	$0,135M + m$
Viga dois pontos para amostras prismáticas		$\frac{4L^3}{bh^3}$	$\frac{M}{4} + m$
Viga três pontos para amostras prismáticas		$\frac{24L^3}{\pi^4 bh^3} \approx \frac{L^3}{4bh^3}$	$\frac{M + m}{2}$
Viga quatro pontos para amostras prismáticas		$\frac{L^2 A}{bh^3} \left( \frac{3}{4} - \frac{A^2}{L^2} \right)$	$R(X) \left( \frac{M}{4} + \frac{m}{R(A)} \right)$
Tensão indireta em amostras cilíndricas		$\frac{1}{b} \times (v + 0,27)$	-
Tensão direta de compressão em amostras cilíndricas		$\frac{4h}{\pi D^2}$	$\frac{M}{2} + m$
Tensão direta em amostras cilíndricas e prismáticas		1	0

Fonte: EN 12697-26 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness*)

### 2.2.2.2. Normatização do ensaio de módulo dinâmico

Neste item são apresentadas três normativas utilizadas para determinação do módulo dinâmico em amostras cilíndricas sobre carregamento uniaxial, sendo elas a ASTM D 3497 – *Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures*, AASHTO T 342/11 - *Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)* - e a EN 12697 26/2004 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness*. Salienta-se que no Brasil ainda não há uma norma que regulamente este ensaio, sendo necessário a busca em procedimentos especificados em outros países. A Tabela 2 apresenta um resumo dos principais critérios estabelecidos para ensaio de módulo complexo pelas diferentes normas utilizadas.

Tabela 2: Comparativo entre as normas para o ensaio de módulo complexo.

Parâmetro/Norma	ASTM D - 3497	AASHTO T 342/11	EN 12697-26/2004
Tipo de carregamento	Senoidal ( <i>Haversine</i> )	Senoidal ( <i>Haversine</i> )	Senoidal
Diâmetro da amostra (mm)	101,6	moldada a 150 e extraída do centro 100	50 a 160 com extração
Relação altura/diâmetro da amostra	2/1	altura = 170mm	1,8/1 a 3/1
Relação mínima com diâmetro máximo nominal do agregado	4	-	4
Número mínimo de amostras	3	2	-
Temperaturas (°C)	5, 25 e 40	-10; 4,4; 21,1; 37,8 e 54	10, 20, 30 e 40
Frequências (Hz)	1, 4 e 16	0,1; 0,5; 1,0; 5; 10 e 25	0,1;0,3; 1,0; 3,0; 10 e 20
Tempo de condicionamento	Não estabelecido	entre 6 a 1 hora	4 horas
Número máximo de ciclos	Prevê um tempo mínimo de 30 a 45s	200	Não estabelecido
Método de ensaio	Tensão controlada	-	Deformação controlada
Parâmetro	0 a 241kPa	50 a 150 $\mu\epsilon$	$\leq 50\mu\epsilon$

#### a) ASTM D 3497

A normativa ASTM D 3497 (*Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures*) propõe que o ensaio seja realizado aplicando um carregamento axial senoidal (*Haversine*) que deve variar de 0 a 241 kPa por um tempo mínimo de 30 segundos, não excedendo 45 segundos.

O ensaio deve ser realizado no mínimo nas temperaturas de 5, 25 e 40°C nas frequências de 1, 4 e 16 Hz para cada temperatura.

As amostras devem ser moldadas conforme ASTM D 3496 (*Method for Preparation of Bituminous Mixtures Specimens for Dynamic Modulus Testing*), devendo apresentar uma relação de altura/diâmetro de 2 para 1, sendo o diâmetro mínimo de 101,6 mm e quatro vezes maior que o tamanho máximo nominal do agregado. A norma requer no mínimo três amostras para o ensaio.

Durante o ensaio a frequência em cada temperatura deve ser testada duas vezes, sendo duplicada depois que todas as frequências foram realizadas naquela temperatura.

b) AASHTO T 342/11

A amostra para o ensaio de módulo dinâmico deve ser compactada no compactador giratório utilizando um molde de diâmetro de 150 mm obtendo-se uma altura de 170 mm. Posteriormente deve ser extraída do centro uma amostra de aproximadamente 100 mm de diâmetro. Observar que o volume de vazios no centro da amostra é 1,5 a 2,5% menor que o volume de vazios total da amostra. Para se obter um erro estimado de  $\pm 15\%$  utilizando 2 LVDTs são necessário 3 amostras, caso o erro assumido por de  $\pm 18\%$  são necessárias 2 amostras.

A série de ensaios necessários para desenvolver a curva mestra segundo a normativa, deve ser conduzido nas temperaturas de -10; 4,4; 21,1; 37,8 e 54,4°C nas frequências de 0,1; 0,5; 1,0; 5; 10 e 25 Hz para cada temperatura. A mesma recomenda que se inicie pela temperatura mais baixa (de -10 a 54°C) e pela frequência mais alta (de 25 a 0,1Hz). O tempo de condicionamento para cada temperatura está especificado na Tabela 3. A normativa salienta que a temperatura deve ser controlada por uma amostra com sensor de temperatura instalado.

Tabela 3: Tempo de equilíbrio recomendado.

Temperatura (°C)	Tempo para temperatura da estufa a partir de 25°C	Tempo da temperatura do ensaio anterior
-10	de um dia para o outro	de um dia para o outro
4	de um dia para o outro	4 horas ou de um dia para o outro
21	1 hora	3 horas
37	2 horas	2 horas
54	3 horas	1 hora

Fonte: Adaptado da AASHTO T 342/11

A aplicação do carregamento senoidal (*Haversine*) deve ser aplicado de maneira cíclica de modo a obter deformações de 50 a 150  $\mu\epsilon$ . A Tabela 4 apresenta os valores típicos de tensão aplicados para obtenção do módulo dinâmico.

Tabela 4: Níveis de tensão típicos.

Temperatura (°C)	Varição (kPa)
-10	1400 a 2800
4	700 a 1400
21	350 a 700
37	140 a 250
54	35 a 70

Fonte: Adaptado da AASHTO T 342/11

No início do teste a norma recomenda aplicar na amostra 200 ciclos a 25 Hz nos níveis de tensão apresentados na Tabela 5. Posteriormente o carregamento deve seguir o especificado na Tabela 5. Um período de descanso entre cada frequência de 2 minutos deve ser observado, não excedendo 30 minutos.

Tabela 5: Número de ciclos para a sequência de ensaios.

Frequência (Hz)	Número de ciclos
25	200
10	200
5	100
1	20
0,5	15
0,1	15

Fonte: Adaptado da AASHTO T 342/11

A AASHTO T-342/11 recomenda que sejam obtidos para os cálculos de módulo complexo e ângulo de fase 50 pontos por ciclo em 5 ciclos, totalizando 250 pontos de análise. Na análise da tensão o primeiro passo é a analisar os dados na matriz de tensão. A análise de dados é realizada nos pontos centrados que são calculados a partir dos dados de tensão por ponto subtraindo a tensão média.

c) EN 12697-26/2004

A norma europeia apresenta diferentes métodos de caracterização da rigidez de misturas asfálticas. Em seu Anexo D [*Direct tension-compression test on cylindrical specimens*] exhibe os requisitos necessários para o ensaio em amostras cilíndricas em compressão axial sobre um carregamento senoidal.

A amostra compactada deve ter entre 50 e 160 mm, e ser igual ou maior que 4 vezes o tamanho nominal máximo do agregado utilizado na mistura. A altura da amostra deve ser entre 1,8 e 3 vezes o tamanho da amostra. As amostras retiradas do núcleo devem ser armazenadas entre duas semanas e dois meses antes do teste. A norma recomenda que as extremidades das amostras sejam coladas a plataforma de carga.

A deformação controlada deve se manter menor que  $25 \mu\epsilon$  para se manter no âmbito linear das misturas asfálticas. Mas a mesma ressalta que experiências com um grande número de testes mostraram que a maioria das misturas asfálticas devem se manter abaixo de  $50 \mu\epsilon$  para prevenir danos de fadiga.

Para cada temperatura de ensaio, a normativa prevê que as amostras devem ser mantidas a temperatura do ensaio durante um período de no mínimo quatro horas na câmara de ensaio sendo o mesmo iniciado com a temperatura mais baixa. O módulo de complexo deve ser determinado a não menos do que quatro temperaturas e para cada temperatura não inferior a 6 frequências. Em nota a normativa recomenda utilização das temperaturas de 10, 20, 30 e  $40^{\circ}\text{C}$  e as frequências de 0,1; 0,3; 1,0; 3,0; 10 e 20 Hz.

#### 2.2.2.3. Fatores importantes sobre o ensaio

Alguns fatores do ensaio de módulo complexo são de grande importância, e geram alterações significativas nos resultados. Por isso os itens a seguir apresentam uma discussão sobre estas condicionantes.

##### a) Fabricação da amostra

As normativas apresentadas anteriormente ASTM D 3497 e AASHTO T 342/11 e ainda a NCHRP RRD 370/12 (*Guidelines for Project selection and materials sampling, conditioning, and testing in WMA research studies*) recomendam que amostra seja compactada em molde com 150 mm e posteriormente extraída do centro uma amostra de 100 mm, já as alturas finais da amostra variam entre 200 mm, 170 mm e 150 mm, respectivamente.

Witczak et al. (2000) determinou o tamanho mínimo da amostra que provasse que suas dimensões simulassem corretamente as propriedades do material, sendo as mesmas independentes das dimensões da amostra compactada e do tamanho máximo nominal do agregado utilizando o compactador giratório Superpave. O experimento inclui amostras com relações altura/diâmetro de 1; 1,5; 2 e 3, diâmetros da amostra de 70, 100 e 150 mm e tamanho

máximo nominal do agregado de 12,5; 19 e 37,5mm. Para o ensaio de módulo dinâmico um diâmetro de 70 mm com uma relação altura/diâmetro de 1,5 ou maior apresentou resultados aceitável entre 4 e 40°C (Kim, 2009)

O mesmo autor também recomenda que sejam utilizadas entre extremidades da amostra e as placas de aço um tratamento para redução de atrito com utilização de folhas de látex de 0,5 mm de espessura com silicone ou separadas por graxa de vácuo. Kim (2009) ressalta que este tratamento é necessário para se ter uma distribuição homogênea das tensões, evitando eventuais erros que a falta de nivelamento possa produzir.

No estudo de Nascimento (2015) utilizou-se amostras com altura de 150mm e diâmetro de 100mm. O mesmo justificou que conforme estudo de Robinette and Williams (2006) onde foram comparadas amostras extraídas do centro do corpos de prova e amostras somente moldadas, sem nenhum corte, os resultados de módulo dinâmico medidos para ambos os casos são similares. Em outro estudo de Nascimento et al. (2014) foram realizadas microtomografia computadorizada, processamento digital de imagens e ensaios mecânicos, cujos resultados, indicam que a obtenção de corpos de prova sem nenhum tipo de corte e moldado em 150mm de altura e 100mm diâmetro se mostraram apropriados para serem utilizados no ensaio de módulo dinâmico.

#### b) Números de ciclos e período de descanso

Di Benedetto et al. (2001) ressalva que a amplitudes e o número de ciclos de carga deve ser pequena para evitar efeitos termodinâmicos no módulo de medição. A energia dissipada criada durante cada ciclo pode aquecer a amostra no início do ensaio e o diminuir o valor do módulo. Essa redução é proporcional à frequência e ao quadrado da amplitude de deformação. Devido ao efeito de aquecimento local, a variação do módulo pode rapidamente chegar a alguns porcentos. Portanto, o mesmo recomenda-se aplicar à menos de 100 ciclos para uma determinação módulo.

Kim (2009) observa que o período de repouso entre as frequências ajuda a prevenir a amostra de aquecimento durante o teste cíclico. Apesar da determinação do módulo ser realizada com um número de ciclos limitado a menos do que 200 o aumento do calor pode não ser um problema. No entanto, o período de repouso permite que algumas das deformações transientes possam se recuperar durante o ensaio, podendo ter algum efeito sobre os valores do módulo e

seleção de métodos de análise de dados adequados. A AASHTO T 342/11 apresenta também uma limitação para o número de ciclos menor que 200.

c) Temperaturas e frequências

Di Benedetto et al. (2001) ressalta que para avaliar a dependência das propriedades de rigidez no âmbito da temperatura-frequência, as condições de ensaio devem incluir uma ampla gama de variação de temperaturas e frequências. O mesmo recomenda que sejam utilizadas no mínimo temperaturas de -10 a 40°C e frequências de 0,5 a 30 Hz.

d) Volume de vazios

O estudo NCHRP RRD 370/12 determinou para que ensaios de módulo dinâmico para amostras misturadas e compactadas em laboratório seja utilizado uma porcentagem de número de vazios de  $7,0 \pm 0,5\%$ . Já, Nascimento (2008) observa que a utilização de volumes de vazios igual a  $5,5 \pm 0,5\%$  para amostra dosadas para um volume de vazios de 4% é uma prática comum.

Bennert (2010) analisou dois volumes de vazios diferentes no ensaio de módulo dinâmico. A comparação dos resultados está apresentada na Figura 13. Os resultados mostraram que uma diferença mínima de módulo foi encontrada nas temperaturas baixas e intermediárias, com diferenças maiores (de 5 a 10%) nas temperaturas mais altas.

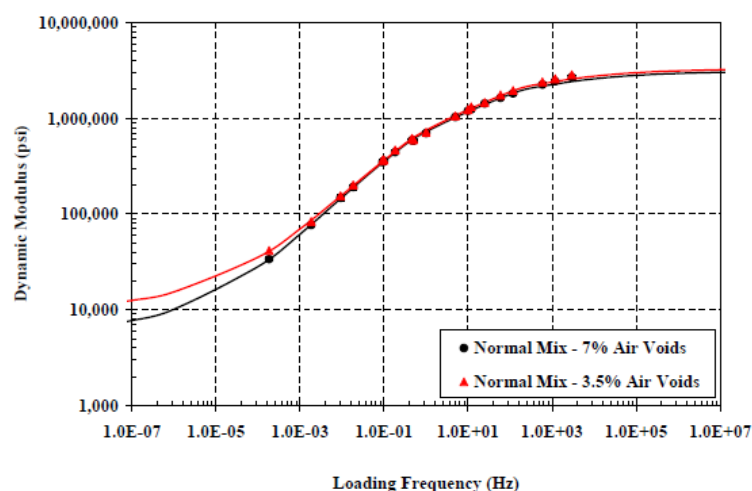


Figura 13: Curva mestra para misturas com diferentes volumes de vazios

FONTE: Bennert (2010)

e) Deformação pico-a-pico

A AASHTO prevê que o ensaio de módulo dinâmico seja realizado com deformação controlada entre 50 e 150  $\mu\epsilon$ . Já a experiência de Underwood (2011) observa que esse protocolo não é suficientemente rigoroso, de modo que possa impedir outros mecanismos, como danos, viscoplasticidade, entre outros. Em vez disso, o autor propõe que a amplitude total pico-a-pico seja de 50 a 75  $\mu\epsilon$  e uma amplitude de esforço de tensão menor que 25 a 37,5  $\mu\epsilon$ , sendo a quantidade total de microstrains de compressão acumulados inferior a 1500  $\mu\epsilon$ .

d) Tempo de condicionamento

Dougan et al. (2003) estudou os tempos de condicionamentos apresentados na AASHTO 342/11. O mesmo conclui que os tempos de condicionamento nem sempre são suficientes para que a amostra esteja em equilíbrio térmico. Para resolver, ele propõe que uma amostra com sensor de temperatura seja montada na câmara de ensaio ao lado da amostra de teste. A Figura 14 mostra o sistema utilizado pelo autor.

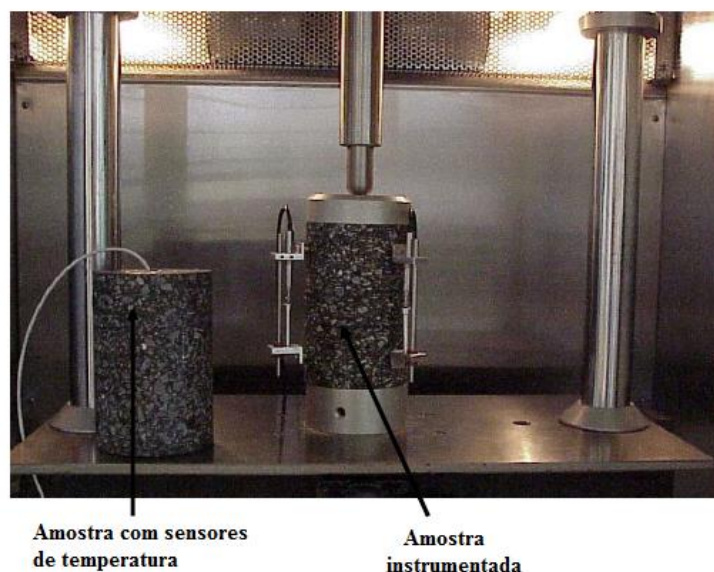


Figura 14: Amostras instrumentadas no equipamento

FONTE: Adaptada de Dougan et al. (2003)

Ele também ressalva que caso a porta da estufa seja aberta entre os testes onde várias amostras estão sendo condicionadas simultaneamente e ensaiadas em sequência, é necessário tempo adicional para a amostra de ensaio atingir o equilíbrio da temperatura de ensaio especificado novamente. Se as amostras são retiradas para transferir os leitores de deformação, a amostra



com os sensores térmicos também deve ser retirada, de outra forma a sua temperatura não reflete a temperatura do corpo de prova.

### 2.2.3. Análise dos dados do ensaio de módulo dinâmico

A análise dos dados obtidos no ensaio de módulo dinâmico envolve a geração de diferentes representações gráficas, incluindo curvas mestras, espaço de Black, curvas isotérmicas, curvas isócronas, representação Cole-Cole. Uma explicação sobre as mesmas estão apresentadas nos itens a seguir.

#### 2.2.3.1. Curva Mestra

A completa caracterização de uma mistura asfáltica requer a geração de curvas mestras, pois definem as propriedades viscoelásticas do material como uma função da temperatura e do tempo. Sendo uma curva horizontal caracteriza um material com comportamento puramente elástico e uma curva próxima a vertical um material muito sensível as variações de temperatura e de frequência. A formação de uma curva mestra possibilita a interpretação dos dados para qualquer combinação de temperatura e frequência, dentro da análise realizada no ensaio.

A curva de equivalência frequência-temperatura ou curva mestra pode ser determinada pela transformação da relação  $E^*(\omega, T)$  na relação  $E^*(\omega f(T))$ . Nesta relação é possível construir uma curva ( $\log |E^*|$ ,  $\log F$ ) para uma temperatura de referência ( $T_R$ ) escolhida arbitrariamente, com a translação paralela dos eixos das frequências de cada isotérmica relacionada com a isotérmica correspondente e a temperatura de referência, até que haja uma superposição de pontos de mesma ordenada (Otto, 2009).

Os dados coletados em diferentes temperaturas podem ser deslocados relativos ao tempo de carregamento ou frequência, para isso as várias curvas devem ser alinhadas para formar uma única curva mestra. O fator de deslocamento  $\alpha(T)$  define o deslocamento necessário para uma dada temperatura, que é constante no tempo mas deve ser dividida para chegar a um tempo reduzido para a curva mestra (Kim, 2009).

Para se obter a frequência reduzida ( $f_R$ ) é necessário multiplicar pelo fator de deslocamento  $\alpha(T)$  conforme Equação 12.

$$f_R = f \cdot \alpha(T) \quad \text{Equação 12}$$

A curva mestra deve ser obtida levando em consideração uma temperatura de referência, sendo geralmente 20°C. Nessa temperatura de referência, o fator de deslocamento pode ser igual a 1 ou a zero.

Um estudo de Pellinen, Witczak & Bonaquist (2002) e Pellinen (2002) desenvolveram um método para um construir uma curva mestra utilizando uma técnica experimental de deslocamento para uma função de ajuste sigmoidal. Entre vários modelos de previsão, o modelo sigmoidal é usado pelo MEPDG e pode ser considerado um dos mais populares (Yusoff et al., 2011). O modelo está apresentado na Equação 13 e está validado para temperaturas de -18°C até 55°C (Kim, 2009)

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma \log(\xi)}} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

$\delta$  = valor mínimo do módulo;

$\alpha$  = intervalo do valor do módulo; igual a  $\vartheta$

$\beta, \gamma$  = parâmetros de forma.

A Figura 15 apresenta a obtenção dos parâmetros graficamente. É possível observar que o parâmetro  $\gamma$  é função da inclinação da função. Mello (2008) observa que os coeficiente  $\delta$  e  $\alpha$  dependem da granulometria da mistura, da quantidade de ligante e de vazios na amostra. Já os coeficientes  $\beta$  e  $\gamma$  estão relacionados com as características do ligante e com a magnitude de  $\delta$  e  $\alpha$ .

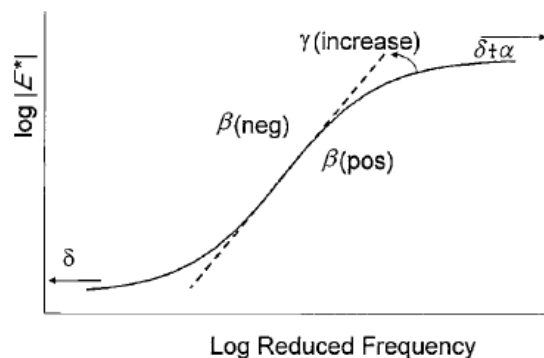


Figura 15: Obtenção dos parâmetros para curva mestra.

Fonte: Kim, 2009

O modelo da interpolação, conhecido como curva mestra, consiste em dois submodelos:

- Um modelo que utiliza o princípio de sobreposição do tempo-temperatura e determina para cada temperatura os deslocamentos necessários no domínio da frequência para obter os mesmos valores a uma temperatura de referência (normalmente 20°C), mas com uma frequência deslocada. Essas mudanças resultam em frequências à temperatura de referência referidos como frequências reduzidas.
- Um segundo modelo (geralmente uma curva sigmoïdal) que é ajustada aos pontos deslocados à temperatura de referência.

Modelos de sobreposição das curvas para materiais viscoelásticos podem ser usados, como por exemplo, Arrhenius, e Williams, Landel e Ferry (WLF) e a translação gráfica.

Para a fórmula de William, Landel e Ferry (WLF) e a equação de Arrhenius, o coeficiente de translação ( $a_T$ ) da isotérmica T em relação à isotérmica  $T_R$  da referente escolhida é  $\log(a_T)$ , tal que  $E^*(\omega, a_T)$  com  $a_T=1$  (Otto, 2009). A representação  $\log(a_T)$  para WLF está apresentada na Equação 14 e para Arrhenius na Equação 15.

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_R)}{(T - T_R) + C_2} \quad \text{Equação 14}$$

$$\log(a_T) = \frac{\delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

$C_1$  e  $C_2$  = constantes dependentes do material;

$\delta H$  = energia aparente de ativação característica do material;

R = constante universal dos gases (8,31J/mole/°K);

T e  $T_R$  = temperatura expressão em °K.

Na translação gráfica, um ponto de referência é escolhido ( $F_{ref}$ ,  $E_{ref}$ ) sobre a curva que se quer transferir (Figura 16). Sobre a outra curva, três pontos são escolhidos ( $F1,E1$ ;  $F2,E2$  e  $F3,E3$ ) de maneira que o valor do módulo do ponto de referência seja próximo do valor do módulo no ponto ( $F2,E2$ ). As retas que passam pelos pontos são então determinadas. Dois pontos onde o valor de módulo é igual ao valor do módulo de referência são obtidos. A frequência média destes dois pontos é utilizada para a translação, que é realizada em escala logarítmica (Otto, 2009).

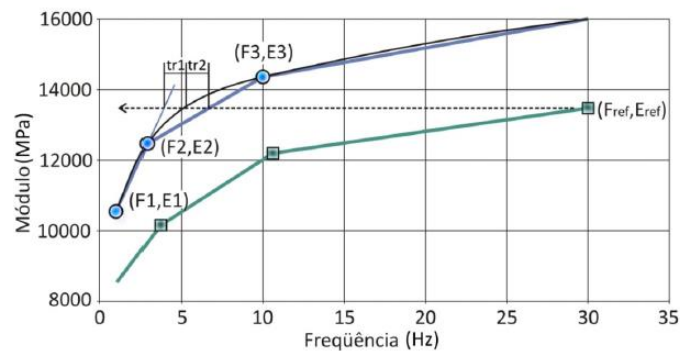


Figura 16: Translação gráfica das curvas isotérmicas

Fonte: Otto, 2009

Conforme Di Benedetto et al. (2001) a validação do princípio da superposição da temperatura-frequência é geralmente verificado com uma boa acurácia para misturas com betume puro. A equação de Arrhenius, que tem apenas um parâmetro e é fácil de ser utilizada. Para o correto ajuste de uma série de temperaturas mais elevadas que  $10^{\circ}\text{C}$  a formulação de WLF é uma outra alternativa. A mesma precisa de 3 constantes e parece ser mais precisa em uma faixa de temperaturas maior.

A utilização da função sigmoideal traz uma previsão mais aproximada do comportamento das misturas asfálticas dentro nos ensaios cíclicos de compressão dentro de um intervalo de temperaturas. O mesmo prevê com acurácia o módulo frágil da misturas em baixas temperaturas, bem como, a influência da graduação dos agregados que fica mais evidente nas altas temperaturas. Outra facilidade de utilizar a função sigmoideal é a possibilidade de obter os fatores de deslocamento através da função do Excel utilizando o “*Solver Function*”.

### 2.2.3.2. Espaço de Black

O espaço de Black é a representação do valor do módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) em função do ângulo de fase ( $\phi$ ) para cada temperatura ensaios, sendo os mesmos apresentados na escala logarítmica, conforme exemplo da Figura 17. No eixo das abcissas que contém o ângulo de fase apresenta-se invertido, ou seja, os valores crescem da direita para a esquerda. O mesmo também pode ser apresentado com o módulo dinâmico em escala logarítmica no eixo x.

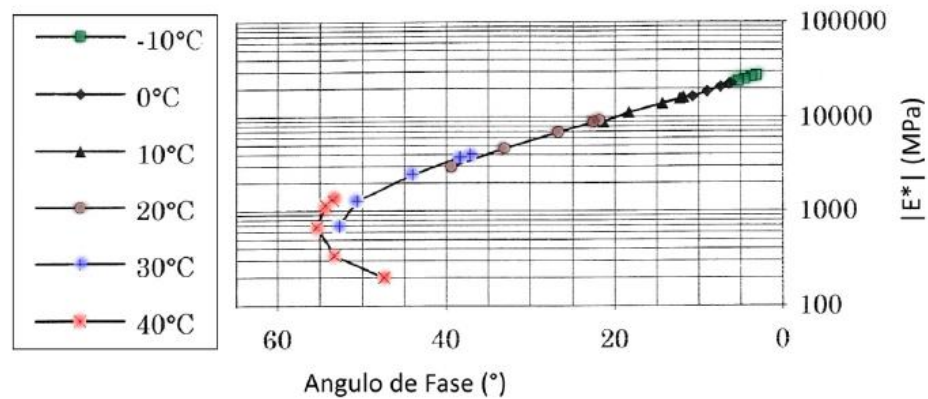


Figura 17: Curva do Espaço de Black

Fonte: De La Roche (1996) *apud* Otto (2009)

Essa curva permite visualizar a zona de valores com baixos módulos, onde os valores de ângulo de fase são maiores é possível notar a influência da temperatura nos valores de ângulo de fase. Para altas temperaturas ocorre uma diminuição do valor encontrado. Esse fenômeno está relacionado à presença dos granulares na mistura, ou seja, para o betume o ângulo de fase aumenta de maneira contínua, porém com granulares próximos ao seu maior valor tende a ter uma assintótica com o aumento da temperatura (Otto, 2009).

### 2.2.3.3. Curvas isotérmicas

As curvas isotérmicas apresentam a representação gráfica do valor do módulo dinâmico em função da frequência aplicada em cada temperatura de ensaio, geralmente em coordenadas logarítmicas. A Figura 18 apresenta um exemplo de curva isotérmica.

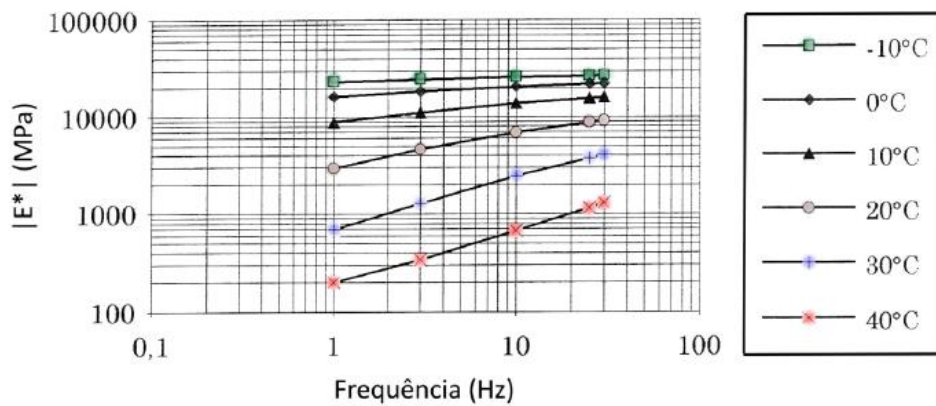


Figura 18: Curvas isotérmicas do módulo complexo.

Fonte: De la Roche (1996) *apud* Otto (2009)

As curvas isotérmicas permitem observar a suscetibilidade cinética da mistura asfáltica em cada temperatura.

#### 2.2.3.4. Curvas isócronas

As curvas isócronas representam em escala semi-log o valor do módulo complexo em função da temperatura, sendo que cada curva é representativa de uma dada frequência. A Figura 19 apresenta um exemplo da curva isócrona.

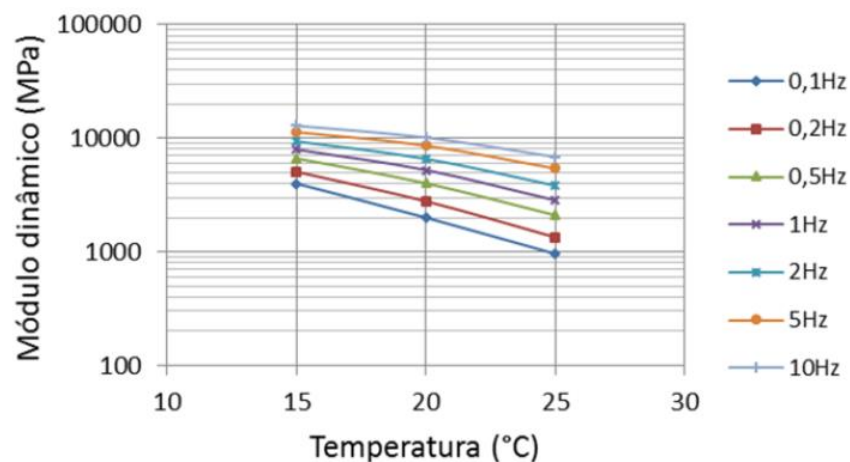


Figura 19: Representação do módulo dinâmico na curva isócrona.

Fonte: Colpo (2014)

Esse tipo de apresentação permite visualizar uma redução do módulo complexo com o acréscimo da temperatura, permitindo assim, verificar a suscetibilidade térmica da mistura

asfáltica. Essa visualização se torna mais simples através da inclinação das curvas, nesse sentido, quanto maior a inclinação da curva, maior é susceptibilidade cinética da seja, ou seja, maior é o seu efeito do tempo de carregamento reológico do material.

#### 2.2.3.5. Representação Cole-Cole

O plano cole-cole é a representação gráfica dos valores do módulo de perda ( $E_2$ ) em função do módulo de armazenamento ( $E_1$ ) em escala aritmética, conforme Figura 20. Esta curva é semelhante a um arco de círculo, independente da frequência e da temperatura.

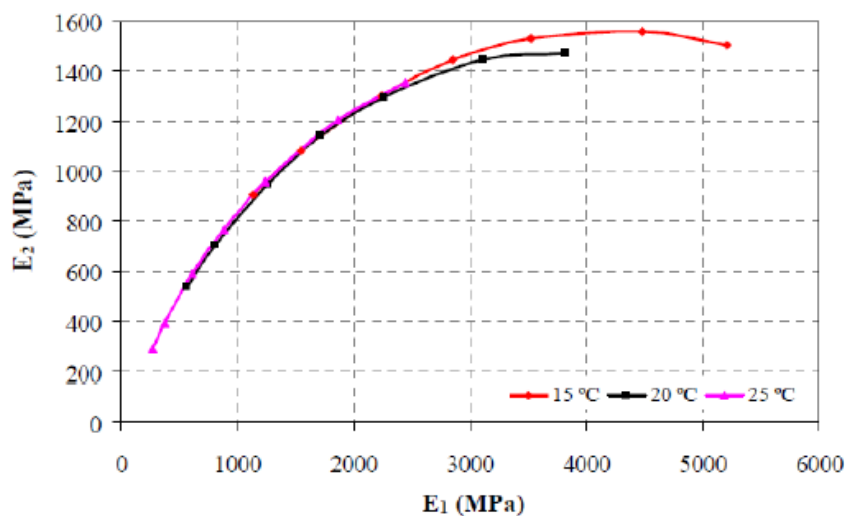


Figura 20: Representação do módulo complexo no plano cole-cole.

Fonte: Fontes (2009) *apud* Colpo (2014)

Esse tipo de representação permite avaliar em qual temperatura e frequência tem-se a maior energia dissipada em cada ciclo de carregamento. Para estas condições (ou regiões) é que deveriam ser conduzidos os ensaios de fadiga (Colpo, 2014).

#### 2.2.3.6. Inferência a fadiga e deformação permanente

O fator de performance a fadiga da especificação Superpave para ligantes asfálticos é  $|G^*|.sen\phi$ , sendo  $|G^*|$  o módulo cisalhante do ligante asfáltico e  $\phi$  o ângulo de fase, sendo o fator equivalente para misturas asfálticas  $|E^*|.sen\phi$  (Kim, 2009). A análise deve ser realizada nas temperaturas intermediárias, no caso desse estudo a 21°C, que é a temperatura mais próxima à qual é convencionalmente utilizada em ensaios de fadiga.

A especificação Superpave para ligantes asfálticos define requisitos para o fator de deformação permanente, sendo este  $|G^*|/\sin\phi$  calculado em altas temperaturas. De forma similar o fator de deformação permanente pode ser definido para as misturas asfálticas como sendo  $|E^*|/\sin\phi$ . Essa correlação apresentou um  $R^2$  igual a 0,91 com os resultados de deformação permanente (Kim, 2009).

#### **2.2.4. Relação do ligante asfáltico e o módulo dinâmico**

Clyne et al.(2003) relatou que as misturas com ligante asfáltico menos rígidos exibem um módulo dinâmico menor que do que com ligantes mais duros. Mello (2008) observou que as misturas feitas com ligantes menos viscosos estão entre as que resultaram os menores valores de módulo.

Já para as misturas gap graded com asfalto borracha estudadas por Kaloush et al. (2003) indicou que as mesmas fornecem melhor resistência a fissuração a baixas temperaturas (baixo módulo a baixas temperaturas) e a deformação permanente (maior módulo a altas temperaturas). Outros estudos provaram que o asfalto borracha tem uma maior rigidez a baixas temperaturas e maior resistência a deformação permanente em altas temperaturas que misturas convencionais (Xie et al., 2015).

Archilla et al. (2016) mostrou que o módulo dinâmico de misturas com ligantes modificados por polímeros foram mais elevados que as das misturas não modificadas a baixas frequências.

Ensaio de módulo dinâmico realizados a altas temperaturas mostram uma maior influência do esqueleto mineral, já que o ligante passa a estar em um estado menos viscoso, reduzindo sua parcela na capacidade estrutural da mistura (Mello, 2008).

No estudo com materiais brasileiro de Bruxel (2015) foi possível constatar que o ligante asfáltico é o que exerce maior efeito na rigidez das misturas asfálticas estudadas. Foram analisadas quatro tipo de ligantes, o CAP 50/70, o CAP TLA, o CAP 60/85 e o TLA FLEX. A mistura com menor valor de módulo dinâmico foi a com ligante CAP 60/85, enquanto que a mistura mais rígida foi com o ligante CAP TLA.



### 2.3. MISTURAS MORNAS

Misturas asfálticas mornas é um termo genérico utilizado para uma variedade de tecnologias que permitem a produção de misturas asfálticas quentes com redução das temperaturas entre 10 e 40°C. Ao reduzir a viscosidade do betume, encorajar a adesão ativa e/ou aumentar a trabalhabilidade da mistura, tecnologias WMA tem o potencial de reduzir significativamente a temperatura, sem comprometer o desempenho do asfalto.

Com a crescente preocupação mundial com a emissão de gases na camada atmosférica, as misturas asfálticas mornas tem se apresentado como uma solução menos agressiva ao meio ambiente. Durante os últimos cinco anos, o aumento dos custos de combustível e o desenvolvimento de normas ambientais mais rigorosas tem gerado interesse crescente em tecnologias WMA como um meio para diminuir o consumo de energia e as emissões associadas à produção de HMA convencional (Estakhri et al., 2010). Essa redução é importante hoje em dia, uma vez que a utilização de modificadores de ligantes, tais como a borracha, aumentam as temperaturas da mistura, embora proporcionando a vantagem de melhorar a resistência à deformação permanente, fissuração por fadiga e de trincas térmicas (Motta et al., 2014).

Fora das fronteiras brasileiras, principalmente na América do Norte e Europa, misturas asfálticas mais econômicas e com vantagens ambientais e operacionais avançaram significativamente na última década. Conforme NAPA 2014, em 2013 mais de 30% das misturas asfálticas fabricadas nos Estados Unidos da América apresentaram alguma tecnologia de mistura morna, sendo 87% das misturas mornas a partir do processo de espuma asfáltica produzida em usina de asfalto. Na França em 2012 as misturas mornas já representavam 7,5% de toda produção de misturas asfálticas no referido país. Na Noruega em 2012 as autoridades de inspeção dos trabalhadores do país procuraram acelerar o uso de misturas mornas. Para atingir este objetivo, a administradora das rodovias norueguesas promoveu uma recompensa de 4 euros por tonelada de mistura asfáltica quando produzida a temperatura inferior a 25°C em relação a uma mistura convencional, assumindo a mesma qualidade da referência. Na Suíça está a caminho a inclusão das tecnologias de misturas mornas nas normas locais. Outros países europeus como Suécia e Turquia vêm apostando forte nas misturas mornas (EAPA; 2014 *apud* Zubaran, et al., 2015). Sobre as misturas mornas, não há ainda norma brasileira, ao que se saiba, que trate das várias tecnologias possíveis, muitas desenvolvidas nos anos 1990 na Europa e com aplicações em crescimento acelerado nos últimos anos (Zubaran, et al., 2015).

Chowdhury et al.(2008) cita alguns dos mais importantes benefícios das misturas mornas sendo como:

- Temperaturas significativamente mais baixas na produção e compactação;
- Menor consumo de combustível/energia, reduzindo assim os custos;
- Menor envelhecimento do ligante durante a mistura e compactação, melhorando assim a vida útil do pavimento;
- Redução da segregação térmica na esteira;
- Diminuição das emissões e odores durante a mistura e compactação em campo;
- Diminuição da produção de fumaça devido as menores temperaturas e menor tempo de aquecimento;
- Temporada estendida de pavimentação (isto é, pavimentação durando as épocas mais frias);
- Distância estendida entre a usina e a pista (devido a menor diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura da mistura), proporcionando área de mercado expandida;
- Pavimentação em áreas não habitadas;
- Facilidade de compactação, que é um benefício para misturas mais rígidas, misturas com material fresado e reduzido esforço de compactação;
- Melhores condições de trabalho na usina e para a equipe que trabalha na pavimentação;
- Diminuição da consternação do público sobre as emissões; e
- Facilidade de licenciamento para central de usinagem em áreas urbanas.

Essa tecnologia também visa um ganho econômico, pois há uma redução significativa da temperatura de mistura e compactação da mistura asfáltica com poucas alterações nas propriedades, o que provoca uma redução do custo energético. A classificação de asfalto pela temperatura de produção é apresentada na Figura 21.

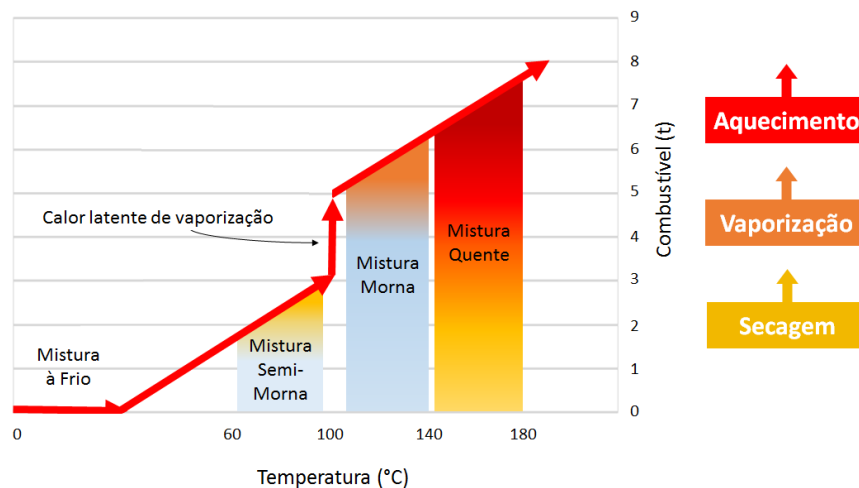


Figura 21: Classificação do asfalto pela temperatura de mistura

FONTE: Adaptado de Zaumanis et al. (2011)

Motta et al. (2014), apresenta uma experiência brasileira na utilização de um aditivo surfactante na produção de uma mistura grad-graded com asfalto borracha. A mesma conclui que a redução da temperatura não afetou significativamente a compactação (por meio dos volumes de vazios), bem como o módulo de resiliência e a resistência a tração por compressão diametral. Foi também realizado o ensaio no *French wheel tracking* para análise da susceptibilidade à deformação permanente, sendo que os autores concluíram que a mistura WMA não possui um potencial significativo a deformação permanente. As análises realizadas em campo após dois anos de construção não mostram diferenças no comportamento da mistura WMA em relação a HMA.

Buss et al. (2011) conduziu ensaios com 16 misturas asfálticas moldadas em campo e em laboratório com diferentes tecnologias WMA. O mesmo concluiu que os valores de módulo dinâmico são estatisticamente iguais comparados com os valores da mistura de controle.

Klinsky et al. (2014) realizou a análises de curvas mestras de misturas asfálticas mornas utilizando uma mistura de referencia (Q-1) e 3 misturados com aditivos para misturas mornas (M-1, M-2 e M-3). Os resultados do estudo mostraram uma tendência de redução de rigidez das misturas asfálticas mornas no ensaio de módulo dinâmico (Figura 22), bem como no ensaio de módulo de resiliência em relação a mistura de referência.

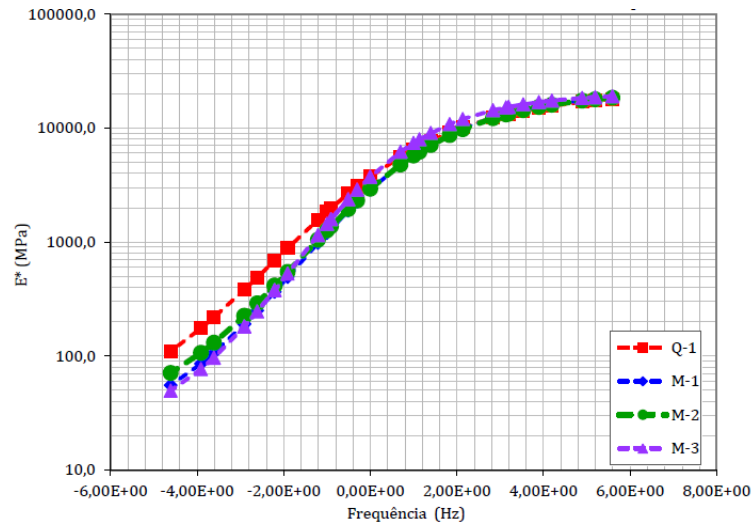


Figura 22: Curva mestra das misturas asfálticas preparadas em laboratório

FONTE: Klinsky et al. (2014)

### 2.3.1. Aditivo surfactante

O aditivo surfactante de nome comercial Evotherm foi desenvolvido pela empresa MeadWestvaco (MWV), sendo que no ano de 2015 o departamento de especialidades químicas foi separado da MWV denominando-se Ingevity.

O Evotherm 3G é a terceira geração do aditivo. Esta forma é livre de água, assim, sendo adequado para utilização em misturas asfálticas. O aditivo pode ser utilizado com ou sem polímero modificador, não ocasionando restrições a utilização de ligantes modificados.

A tecnologia Evotherm® provoca a formação de micelas que desenvolvem “planos de deslizamento” o que permite que as partículas de asfalto se movimentem mais facilmente, exigindo menor energia mecânica durante a mistura e a compactação. Ou seja, é um verdadeiro promotor de compactação. A mistura morna com tecnologia Evotherm® apresenta as mesmas propriedades reológicas que o CBUQ convencional quando submetida a baixas forças de cisalhamento; mas quando submetida a alto cisalhamento (usinagem e rolagem) apresenta menor viscosidade mesmo em temperaturas mais baixas (UFRGS, 2015)

A adição de Evotherm 3G não modifica as propriedades de caracterização do ligante asfáltico, assim, o teor de ligante asfáltico de projeto determinado na mistura asfáltica convencional a quente é o mesmo valor que deve ser utilizado na mistura asfáltica morna (Klinsky et al., 2014).

Hurley et al. (2008) observou que na mistura em estudo contendo Evotherm®, há uma redução de 22 para 82% nos vapores de asfalto em relação a mistura de controle. Bennert (2010) encontrou uma redução de 23% das partículas totais.

A MWV relata que testes em campo demonstraram uma redução de 38°C nas temperaturas de mistura e que a redução das temperaturas pode levar à economia de energia da usina de 55%; o que resulta numa redução de 45% em emissões de CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>, uma redução de 41% em material orgânico total e frações solúveis de benzeno abaixo dos limites detectáveis (Chowdhury et al., 2008)

Na pesquisa de Hurley et al. (2008) foram realizadas análise do módulo dinâmico de três aditivos diferentes para WMA e uma mistura HMA para controle, em um projeto realizado em St. Louis, Missouri. A Figura 23 apresenta as curvas mestras encontradas pelo mesmo, pode-se constatar que para nenhum dos aditivos há uma mudança significativa nos valores de módulo dinâmico.

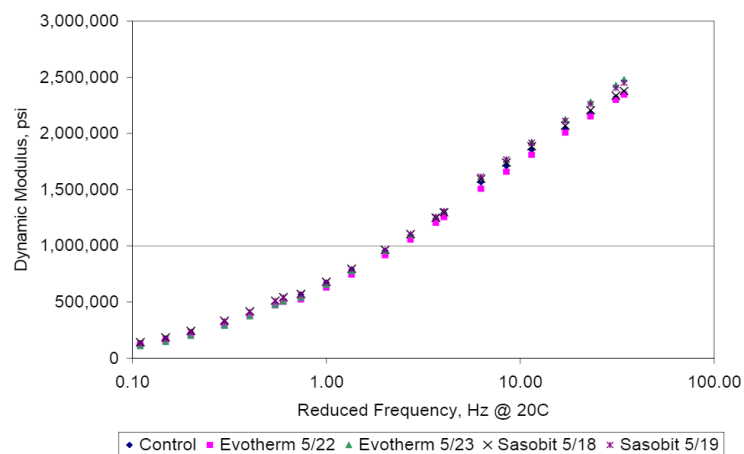


Figura 23: Curvas mestras do módulo dinâmico, St. Louis, Missouri

FONTE: Hurley et al. (2008)

### 3. EQUIPAMENTOS, MÉTODOS E MATERIAIS UTILIZADOS

Neste capítulo será apresentado a caracterização dos materiais empregados na pesquisa, bem como, os métodos adotados para a obtenção dos resultados. Também estão descritos os procedimentos utilizados na elaboração das misturas asfálticas e na confecção das amostras. A pesquisa foi inteiramente realizada no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LAPAV/UFRGS.

Apesar da pesquisa não focar nas variáveis existentes na realização do ensaio de módulo complexo, o mesmo foi executado pela primeira vez no LAPAV/UFRGS, portanto, este capítulo inclui um estudo extensivo sobre a realização do ensaio e dos parâmetros importantes na realização, para definição da metodologia adequada.

#### 3.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desta pesquisa inclui os itens:

- a) Caracterização do agregado pétreo e dos ligantes asfálticos;
- b) Definição do teor ótimo de ligante asfáltico através da Metodologia Marshall;
- c) Obtenção de parâmetros de resistência e adesividade através dos ensaios de resistência a tração por compressão diametral, módulo de resiliência e dano por umidade induzida, todos no teor projeto de ligante asfáltico;
- d) Definição das propriedades volumétricas (altura, diâmetro, relação altura/diâmetro e volume de vazios) das amostras do ensaio de módulo dinâmico;
- e) Determinação do sistema de compactação das amostras para o ensaio de módulo dinâmico;
- f) Escolha da metodologia adequada para a realização do ensaio de módulo dinâmico;
- g) Realização da adaptação da rotina de ensaio no equipamento MTS 810 do Laboratório de Pavimentação da UFRGS (LAPAV) para utilização nos ensaios;

## 3.2. EQUIPAMENTO UTILIZADO

Para viabilizar o estudo foi necessária a adaptação de um equipamento existente no Laboratório de Pavimentação da UFRGS. Desta forma foi possível adequar o equipamento para a realização dos ensaios dentro da metodologia proposta.

O texto correspondente ao equipamento MTS 810 foi baseado nos manuais de seus componentes. Os manuais estão citados nas referências bibliográficas.

### 3.2.1. MTS 810

A MTS 810 proporciona uma ampla capacidade de ensaios estáticos e dinâmicos, com baixa ou alta tensão. A partir de uma variedade de carregamentos, classificações de fluxo da servovalve, capacidade da bomba, software e acessórios a MTS 810 pode ser configurada para atender as necessidades do ensaio a ser realizado.

A unidade de carregamento utilizada é o Modelo 318.25 da MTS. A unidade possui como força nominal até 250 kN. A unidade de carregamento conta com vários componentes, sendo alguns deles a Servovalve (controla a taxa de fluxo e a direção de fluido que entra nos atuadores, determinando o quão rápido o atuador se estende e retrai), LVDT (mede o deslocamento de viagens do atuador, localizado no interior do atuador), atuador linear e transdutor de força (mede as forças axiais aplicadas a amostra).

O controlador digital utilizado é a FlexTest GT. O mesmo possui a capacidade de fornecer em alta velocidade, em tempo real do controle de malha fechada, aquisição de dados, geração de função e transdutor condicionado para multicanal, aplicações múltiplas, permitindo que vários sistemas de teste possam ser conduzido a partir de um controlador. O controlador FlexTest GT é executado com software MTS 793 e um computador com sistema operacional do Windows <sup>TM</sup>.

A estação de controle remota (em inglês *Remote Station Control* - RSC) fornece uma interface de controle conveniente, portátil para a realização de operações simples, como a manipulação de amostras e configuração de teste. O FlexTest GT requer uma RSC para cumprir as normas de segurança para aplicações de teste de materiais. A RSC simplifica várias operações, incluindo o acionamento dos controles hidráulicos, movendo o atuador para montar espécimes, e iniciar e parar os testes.

Como mencionado anteriormente, a MTS 810 utiliza o software Modelo 793.10 *MultiPurpose TestWare*® (MPT). Com ele é possível criar rotinas de ensaios complexos que incluam comandos, aquisição de dados, detecção de eventos, e instruções de controle externo.

A unidade hidráulica utilizada é do modelo SilentFlo™ 505.07. Esta unidade tem como objetivo fornecer fluido hidráulico de alta pressão para a operação do sistema de ensaio. Como componente adicional da unidade hidráulica é utilizado um sistema com bomba e ventilador para auxiliar no resfriamento do sistema.

A câmara de condicionamento utilizado é do modelo 651 da MTS. A mesma possibilita uma variação da temperatura de -150°C até 540°C. O aquecimento é realizado por convecção forçada, já o resfriamento é realizado com nitrogênio líquido. Todas as paredes da câmaras dispõem de isolamento com fibra de vidro, e na parte frontal uma abertura em vidro temperado que permite a visualização da amostra durante o ensaio.

A Figura 24 mostra a disposição dos componentes do equipamento no Laboratório de pavimentação da UFRGS.

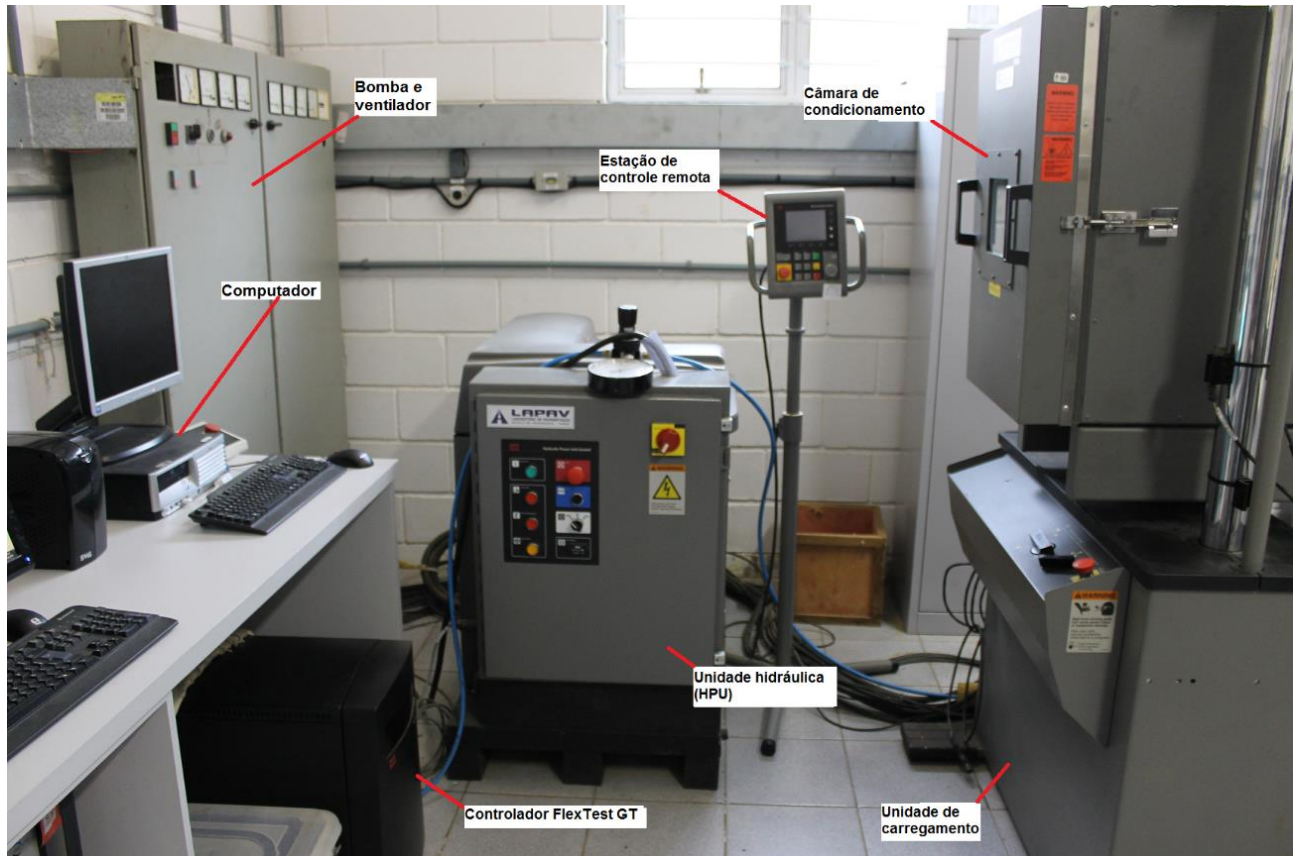


Figura 24: Componentes do equipamento



### 3.2.2. Sensores de deslocamento

Os sensores de deslocamento utilizados são extensômetros axiais do modelo 632.11F-90 da MTS (Figura 25). Os extensômetros possuem um comprimento de curso de 2mm, e haste com comprimento útil de 115mm. Nas extremidades das hastes são encontrados garras metálicas que auxiliam na fixação junto a amostra.



Figura 25: Sensores de deslocamento

## 3.3. MATERIAIS

A seguir estão apresentados os materiais empregados no estudo. Quatro misturas foram dosadas para confecção dos corpos de prova.

### 3.3.1. Agregado mineral

Os agregados utilizados nesta pesquisa são provenientes da pedreira da Construtora Triunfo localizada no km 30 da BR-290/RS, sendo os mesmos de origem basáltica da formação Serra Geral. Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Estado do Rio Grande do Sul (LAPAV/UFRGS). A Figura 26 apresenta a aparência dos agregados utilizados.



Figura 26: Agregados pétreos utilizados na pesquisa

Os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados estão apresentados nas Tabela 6.

Tabela 6: Propriedades dos agregados

Material	Propriedade	Método	Resultado
	Abrasão "Los Angeles"	DNER-ME 035/98	12%
	Equivalente de areia	DNER-ME 054/97	88,2
	Índice de forma	DNER-ME 086/94	0,8
	Durabilidade	DNER-ME 089/94	5,30%
3/4"	Absorção	NBR 6458/84	1,18%
	Massa específica real		2820 kg/m <sup>3</sup>
	Massa específica aparente		2729 kg/m <sup>3</sup>
3/8"	Absorção	NBR 6458/84	2,02%
	Massa específica real		2835 kg/m <sup>3</sup>
	Massa específica aparente		2681 kg/m <sup>3</sup>
Pó de pedra	Absorção	NBR NM 30/01	2,25%
	Massa específica real	DNER-ME 084/95	2866 kg/m <sup>3</sup>

Foi utilizada na composição das misturas cal dolomítica hidratada do tipo CH – I da marca Fibracal. A mesma possui uma porcentagem de hidróxido de cálcio entre 65 a 78% e de hidróxido de magnésio de 15 a 25%.

Os resultados das análises granulométricas dos agregados utilizados na pesquisa encontram-se na Tabela 7, sendo que as granulometrias foram obtidas através do processo de lavagem na peneira número 200. A Figura 27 apresenta as curvas granulométricas dos agregados empregados no estudo.

Tabela 7: Valores médios das análises granulométricas dos agregados

Peneira	Abertura (mm)	3/4"	3/8"	Pó de pedra	Fíller (Cal)
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	97,02	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	41,87	100,00	100,00	100,00
3/8"	9,5	8,96	97,12	100,00	100,00
4	4,76	1,25	6,81	93,53	100,00
10	2,00	1,24	1,43	47,85	100,00
40	0,42	1,23	1,41	19,28	100,00
80	0,180	1,21	1,40	12,72	97,00
200	0,074	1,09	1,35	8,53	84,14

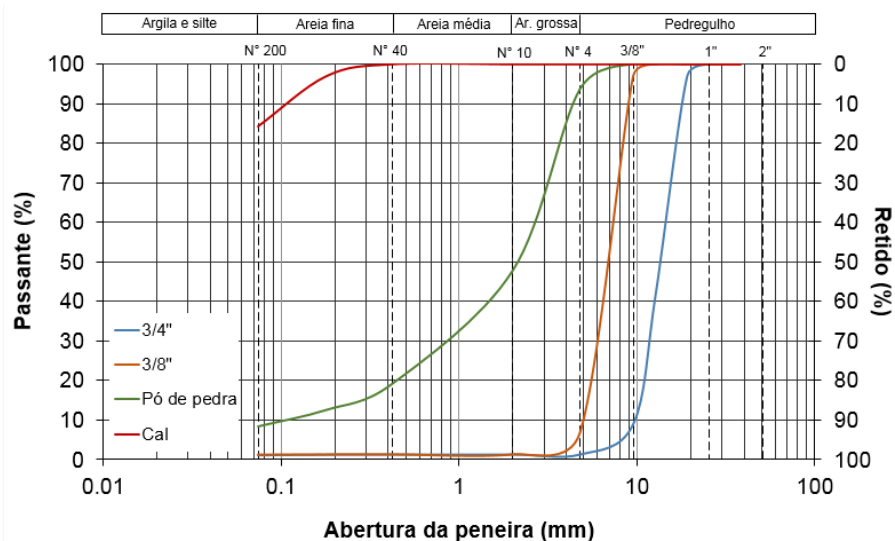


Figura 27: Curva granulométrica dos agregados

### 3.3.2. Cimentos asfálticos de petróleo

Foram utilizados quatro tipos de ligantes asfálticos na composição das misturas, sendo eles:

- Ligante convencional CAP 50/70 da REFAP – Refinaria Alberto Pasqualini;
- Ligante modificado por polímero AMP 60/85 de nome comercial FlexPave comercializado pela Greca Asfaltos;
- Ligante convencional 30/45 com adição de TLA, comercializado pela Betunel;

- Ligante modificado por borracha do tipo AB8 modificado com 15% sobre o peso em pó de borracha de pneu inservíveis, de nome comercial Ecoflex B comercializado pela Greca Asfaltos.

A caracterização desses ligantes foram realizados conforme normativas presentes na Tabela 8.

Tabela 8: Normativas utilizadas na determinação das propriedades dos cimentos asfálticos

Ensaio	Método
Viscosidade Brookfield	NBR 15184
Densidade de materiais betuminosos	NBR6296
Ponto de amolecimento	NBR 6560
Penetração, 25°C, 100g	NBR 6576
Recuperação elástica, 25°C, 20 cm	NBR 15086

### 3.3.3. Aditivo surfactante

O aditivo surfactante Evotherm® 3G foi adicionado ao ligante após ele já estar aquecido em uma porcentagem de 0,4 sobre o peso de ligante. Após a adição foi necessário homogeneizar com o aditivo e colocar novamente na estufa para garantir que no momento da mistura ele estivesse na temperatura adequada. A Figura 28 apresenta a realização do procedimento de adição do aditivo.



Figura 28: Procedimento de adição do aditivo surfactante.

## 3.4. MÉTODOS

Neste item são descritos os métodos utilizados para composição e dosagem das misturas asfálticas, bem como os procedimentos utilizados para execução do ensaio.

### 3.4.1. Temperaturas de mistura e compactação

A viscosidade de um fluido é a relação entre a tensão cisalhante aplicada e a taxa de deformação sofrida. Para materiais termosensíveis, como os ligantes asfálticos, a viscosidade altera-se em função da temperatura. A viscosidade do ligante asfáltico é facilmente obtida através do ensaio com viscosímetro rotacional, também conhecido como viscosímetro Brookfield.

Durante o processo de mistura e compactação é necessário que o ligante possua uma viscosidade ideal. Segundo DNIT 031/2006 - ES (Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço) estabelece que a viscosidade do ligante aquecido seja  $170 \pm 20$  cP e compactado com viscosidade de  $280 \pm 30$  cP, sendo que a temperatura não pode ser superior a  $175^{\circ}\text{C}$ . Para as misturas mornas utilizou-se uma redução de  $30^{\circ}\text{C}$  na temperatura de compactação e dos agregados.

### 3.4.2. Composição granulométrica

As faixas granulométricas utilizadas na pesquisa são aquelas previstas pelas especificações brasileiras, sendo que estas são as mais utilizadas nos projetos de capa de rolamento. Foram utilizadas as especificações do DNIT 031/2006 e DNIT 112/2009.

### 3.4.3. Dosagem Marshall

O teor de projeto de ligante asfáltico é função da energia de compactação, tipo de mistura, temperatura, entre outros. O método Marshall é largamente empregado no Brasil para dosagem de mistura asfálticas, uma vez que a análise realizada garante adequada proporção volumétrica.

Nesta metodologia as amostras são compactadas por impacto. A DNER ME 043/95 recomenda que o esforço de compactação seja de 75 golpes para uma pressão de  $7\text{kgf/cm}^2$  a  $14\text{kgf/cm}^2$ , sendo que não faz recomendações sobre a frequências dos golpes. O compactador utilizado na pesquisa está apresenta do na Figura 29.



Figura 29: Compactador Marshall

A determinação do teor ótimo foi realizada conforme cada uma das especificações, sendo para a faixa C uma porcentagem de volume de vazios aproximadamente 4%, e para a gap graded 5%. As características volumétricas da mistura projetada, teor de ligante, volume de vazios, vazios do agregado mineral, relação betume vazios, densidade máxima medida foram comparadas com as exigidas pelas especificações da faixa. A determinação da densidade máxima medida foi realizada pelo método Rice conforme NBR 15619/12.

Segundo a Ingevity, fabricante do aditivo surfactante, não é necessário que as misturas sejam dosadas utilizando o aditivo, sendo possível a utilização da mesma curva granulométrica e teor de projeto de ligante asfáltico.

Durante o processo de dosagem foi utilizado um tempo de cura de duas horas com o intuito de simular um envelhecimento durante a usinagem e também para uniformizar a temperatura da mistura. Essa prática já era corriqueira no procedimento de dosagem no LAPAV/UFRGS.

#### **3.4.4. Resistência a tração por compressão diametral**

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) consiste em aplicar duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geral, ao longo do



diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse plano (Figura 30). O ensaio é normatizado pela NBR 15087/12 e DNIT 136/2010.

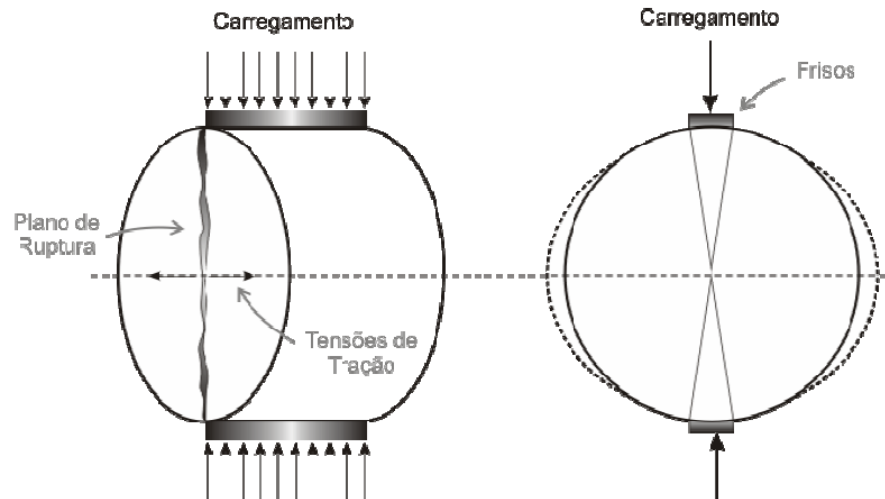


Figura 30: Esquema de carregamento e plano de ruptura típica no ensaio de RT

FONTE: Brito, 2006.

Os corpos de provas utilizados foram moldados no compactador Marshall com diâmetro de 102mm, e altura próxima a 63,5mm. As amostras foram primeiramente condicionadas a 25°C por 4 horas e posteriormente ensaiadas na prensa da Figura 31.



Figura 31: Prensa para ensaio de RT

Após o ensaio, a resistência à tração é determinada pela Equação 16.

$$\sigma_R = \frac{2P_{rup}}{100\pi DH} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

$\sigma_R$  = tensão de tração (Mpa);

$P_{rup}$  = Carga de compressão de ruptura (N);

D = diâmetro do CP (cm);

H = altura do CP (cm).

### 3.4.5. Módulo de resiliência

O módulo de resiliência (MR) de misturas asfálticas é uma relação entre a tensão aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica e a deformação recuperável (resiliente), em dada temperatura.



O ensaio seguiu o procedimento da NBR 16018/11 e DNER – ME 135/10. O mesmo foi realizado aplicando-se uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico de 102mm de diâmetro, moldado no compactador Marshall. A carga aplicada é um pulso com 0,1s de aplicação de carga e 0,9s de repouso, a amostra sofre uma deformação horizontal, a qual é medida através de LVDTs. A amostra foi previamente condicionada na temperatura de 25°C por no mínimo 4 horas, e os carregamentos foram aplicados com 15% da resistência à tração. A Figura 32 apresenta o equipamento utilizado nos ensaios. A aquisição dos dados foi realizada pelo sistema SeePav8200.



Figura 32: Equipamento para ensaio de MR

Após o ensaio o valor do módulo de resiliência foi determinado pela Equação 17.

$$MR = \frac{P}{\Delta H} (0,27 + \mu) \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

MR = módulo de resiliência (MPa);

P = carga vertical aplicada (N);

$\Delta$  = deformação elástica ou resiliente (cm);

H = altura do corpo de prova (cm);

$\mu$  = coeficiente de Poisson

### **3.4.6. Dano por umidade induzida**

A avaliação do dano por umidade induzida é de grande importância, pois afeta o desempenho e a vida de serviço do pavimento, evidenciando os possíveis problemas com adesividade entre o agregado e o ligante asfáltico. Este parâmetro é importante pois avalia mecanicamente a adesividade do ligante asfáltico, e não somente por meio de uma análise visual.

O ensaio de dano por umidade induzida também é conhecido como Lotmann modificado, e normatizado pela NBR 15617/15 (Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida). Para o ensaio foram moldados 6 corpos de prova no compactador Marshall com número de golpes reduzidos, de forma a obter um volume de vazios entre 6 e 8%. Os CPs foram separados em dois grupos. O primeiro grupo é o de referência, foi mantido imerso em água a 25°C por 2 horas, e posteriormente determinada a resistência à tração por compressão diametral.

O segundo grupo foi submetido a imersão e pressão a vácuo, resultando em uma saturação entre 55 a 80%. Após esse procedimento os CPs foram armazenados em sacos plásticos fechados e mantidos a -18°C por 16 horas. Após esse período, as amostras foram imersas em água a 60°C por 24 horas. Por fim, foram condicionados a 25°C por 2 horas e determinada a resistência a tração.

O resultado final do ensaio é a resistência retida a tração (RRT), que é a razão entre a resistência a tração dos corpos de prova condicionados, ou seja, pertencentes ao segundo grupo, e a resistência a tração dos não condicionados. De acordo com Bernucci et al. (2008), o valor mínimo de RRT deve ser superior a 70% para que seja possível garantir uma adesividade adequada.

### **3.4.7. Ensaio de módulo dinâmico**

Os resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase foram determinados a partir de um carregamento senoidal, em diferentes temperaturas e frequências de ensaio. Os itens a seguir apresentamos procedimentos utilizados para moldagem da amostra, metodologia de execução do ensaio e análise dos dados para formação de curva mestra.

#### 3.4.7.1. Moldagem das Amostras

As amostras foram moldadas no compactador giratório Superpave (Figura 33). Para moldagens das amostras foram utilizados moldes de 100mm de diâmetro e 200mm de altura, e utilizados como parâmetros de compactação:

- Ângulo de rotação externo de  $1,25 \pm 0,02^\circ$ ;
- Taxa de 30 rotações por minuto;
- Tensão de compressão vertical durante a rotação de 600 kPa;



Figura 33: Compactador giratório Superpave

No final da compactação procurava-se obter uma amostra com 150mm de altura e 100mm de diâmetro, sem nenhum tipo de corte, mesmo procedimento utilizado por Nascimento (2015). O método mais preciso encontrado pela autora para obtenção da correta densidade aparente, foi a utilização do controle de densidade no compactador, utilizando fatores de correção entre as densidade obtidas no compactador e as determinadas pela NBR 15573/12.

Como propõe a especificação do DNIT 031/06, o grau de compactação da mistura espalhada e compactada em pista deve estar entre 97 a 101%. Como busca-se obter um parâmetro para

dimensionamento de pavimentos, realizaram-se os ensaio em corpos de prova com volumes de vazios entre 5 e 6% (grau de compactação de 98 a 99%). A densidade aparente foi determinada pela NBR 15573/12 e a densidade máxima medida é a mesma obtida durante a dosagem.

#### 3.4.7.2. Procedimento de ensaio

A metodologia utilizada para a realização dos ensaios de módulo dinâmico uniaxial seguiu os procedimentos preconizados na AASHTO T 342/11. Os ensaios foram realizados em corpos de prova de 100mm de diâmetro por 150mm de altura, sem nenhum tipo de corte, e com no mínimo menos de um mês da data da moldagem.

Os ensaios foram realizados nas temperaturas de -10, 4, 21, 37 e 54°C e nas frequências de 25, 10, 5, 1, 0,5 e 0,1 Hz, sendo utilizadas 3 amostras para cada mistura. Para algumas misturas foi necessárias 4 amostras para correção dos resultados finais. O carregamento foi realizado a partir de tensão controlada, sendo que as deformações lidas nos extensômetros deveriam estar na ordem de 50 a 100µε, conforme a recomendação dos pesquisadores citados na revisão bibliográfica.

Após vários testes, o controle de tensão foi escolhido por apresentar maior precisão na formação da senoide do carregamento, e também pela norma determinar níveis de carregamentos máximos e mínimos, facilitando assim o ajuste da tensão/deformação. Não foi possível realizar o carregamento controlado pelos extensômetros pois eles não possuíam uma resposta suficientemente rápida para o equipamento executar o carregamento, e também por questões de segurança do equipamento e do operador.

O procedimento de ensaio é um tanto complexo, devido a mudança da rigidez do material em cada nova temperatura de ensaio, eram necessários ajustes no equipamento. Posteriormente era necessário o ajuste da tensão para atingir a deformação desejada nos extensômetros. Por fim foi realizado o ensaio, e feitas as leituras de amplitude de tensão e deformação.

O Apêndice 1 apresenta com detalhamento como foi realizado o ensaio no equipamento. O procedimento se divide em partes fundamentais:

- a) Verificação mecânica: consiste em verificar se todos os elementos estão bem presos ao equipamento para evitar vibrações, bem como, se a câmara de condicionamento está bem instalada.

- b) Condicionamento do corpo de prova: para caracterização completa da mistura asfáltica é necessário realizar o ensaio em diferentes temperaturas. Seguindo recomendações de Dougan et al. (2003) foi instalada uma amostra com sensores de temperatura para o monitoramento da temperatura da amostra (Figura 34). As amostras foram condicionadas até chegar na temperatura desejada, sendo que a variação máxima da temperatura interna era de  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$  conforme recomendações da AASHTO T 342/10.



Figura 34: Condicionamento do corpo de prova

Foram realizados testes de calibração da estufa, para aferir se a temperatura do controlador era a mesma encontrada na amostra. As mesmas foram condicionadas até atingirem a estabilização da temperatura. A Tabela 9 apresenta a calibração realizada em Dez/16 a qual foi utilizada na pesquisa.

Tabela 9: Calibração da estufa em Dezembro de 2016

Temperatura controlador ( $^{\circ}\text{C}$ )	Temperatura da amostra ( $^{\circ}\text{C}$ )
-13	-10
1	4
20	20
37	37
54	54

- c) Inicialização do equipamento;

- d) Instalação da amostra: Após a moldagem é necessário instalar os extensômetros. Os mesmos foram instalados com a utilização de elásticos (Figura 35). Segundo Nascimento (2015), apesar do elevado custo dos extensômetros MTS, esta abordagem simples dispensa o uso de peças coladas, e tem sido usado facilmente e com sucesso pela Petrobras e na Universidade do Estado da Carolina do Norte, para este tipo de caracterização da mistura.



Figura 35: Amostra instalada

- e) “*Tuning*” (ajuste PID): O “*Tuning*” é um ajuste do seu sistema de teste para que o equipamento responda com precisão o sinal de comando. O ajuste PID, é uma técnica de controle de processos que une as ações derivativa, integral e proporcional, fazendo assim com que o sinal de erro seja minimizado pela ação proporcional, zerado pela ação integral e obtido com uma velocidade antecipativa pela ação derivativa. Este processo tornou-se necessário pois o ensaio foi realizado por controle de força, sendo que este modo exige um novo ajuste caso haja uma alteração na amostra, ou que sejam realizadas mudanças no embolo. Entre a Figura 36 a Figura 37 apresentam as imagens do sinal antes e após o ajuste PID.

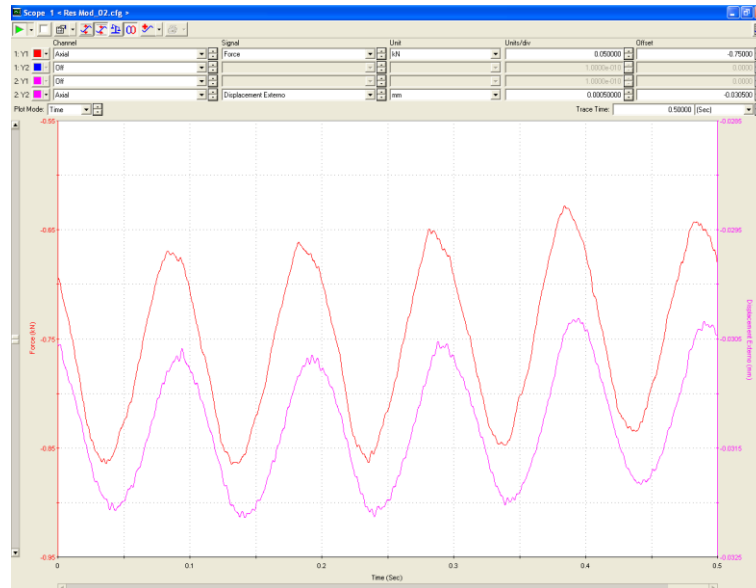


Figura 36: Sinal de força e deslocamento antes do ajuste PID

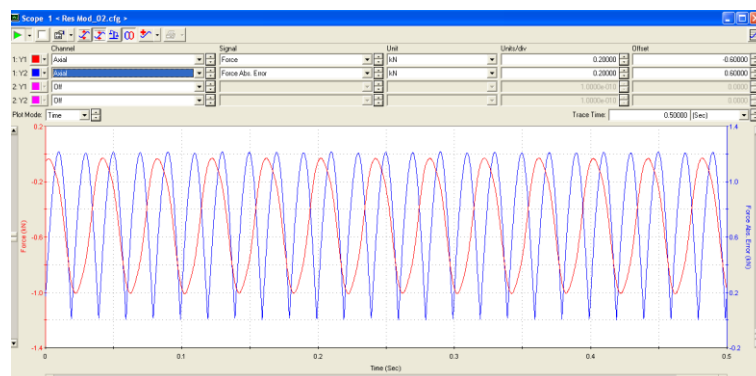


Figura 37: Sinal de força e erro da força após do ajuste PID

O ajuste PID é realizado com cargas reduzidas que foram determinadas após testes, sendo que as mesmas não podem ser tão pequenas, pois pode ocorrer interferências do ruído do equipamento.

- f) Procedimento teste: este procedimento é necessário para seja alcançadas as leituras de deformações de 50 a 100 $\mu\epsilon$  nos extensômetros. Para isso a amostra é testada com um número inferior de ciclos nas tensões recomendadas pela AASHTO T 342/10. Este tipo de teste também foi relatado por Clyne et al. (2003).
- g) Realização do ensaio: após o procedimento teste são determinadas as cargas a serem utilizadas no ensaio. As mesmas devem ser inseridas dentro da rotina no MPT, e a aquisição de dados dos últimos 5 ciclos é realizada. Foram armazenados em média 200



pontos na frequência de 25 Hz, por limitação do equipamento, e 500 pontos por ciclo nas outras frequências.

### 3.4.7.3. Análise dos dados

As análises dos dados foram realizadas com a ferramenta do Microsoft Office Excel. Primeiramente foi utilizado um filtro de sinal de média móvel de 15 a 50 pontos, dependendo do nível de ruído dos sinais de força e deslocamento. A média móvel é um filtro simples que se mostrou eficaz na redução do ruído em grandes e baixíssimas tensões, facilitando a regressão do sinal para uma senoide real e redução do erro entre o sinal real e o sinal senoidal. Pellinen et al. (2003) já alertava que o uso de sinais não filtrados pode criar facilmente mudanças de fase, picos de ruído em vez de picos de sinal fundamentais. A Figura 38 e Figura 39, apresentam um exemplo da utilização do filtro em um sinal de tensão e frequência alta.

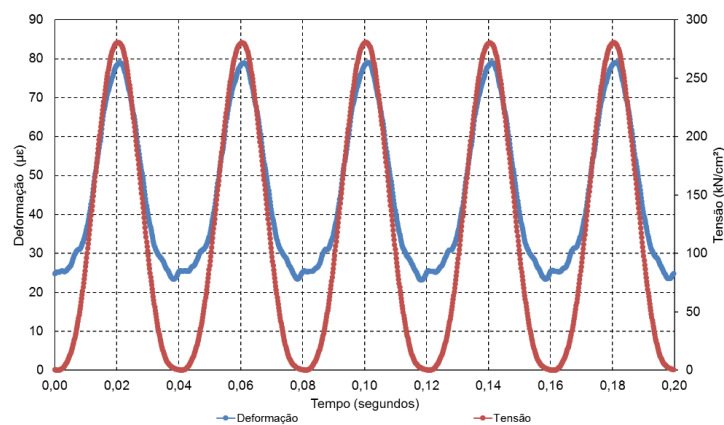


Figura 38: Sinal de tensão e deformação sem filtro

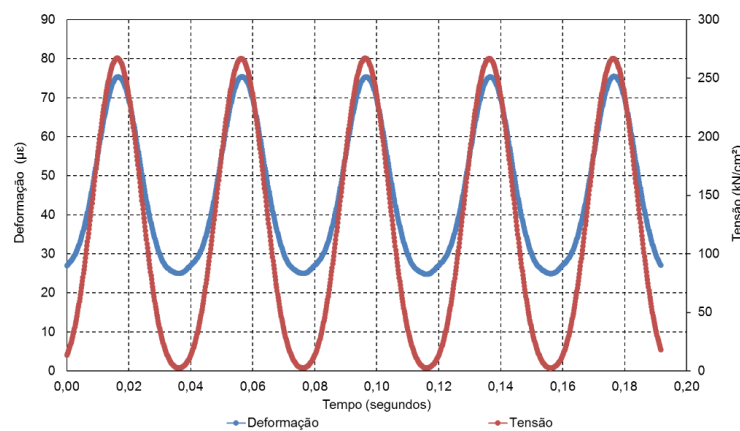


Figura 39: Sinal de tensão e deformação com filtro de média móvel



Neste exemplo foi possível constatar uma redução do erro de 5,3% para a tensão e 2,17 para a deformação, com uma alteração nos resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase de 2 a 4%. Já a Figura 40 e Figura 41 apresentação a utilização da média móvel na minimização do ruído em sinais de baixo carregamento e frequência.

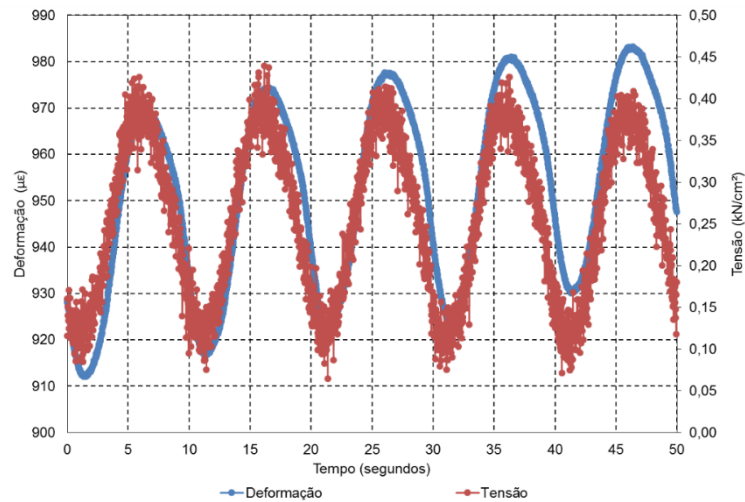


Figura 40: Sinal de tensão e deformação sem filtro

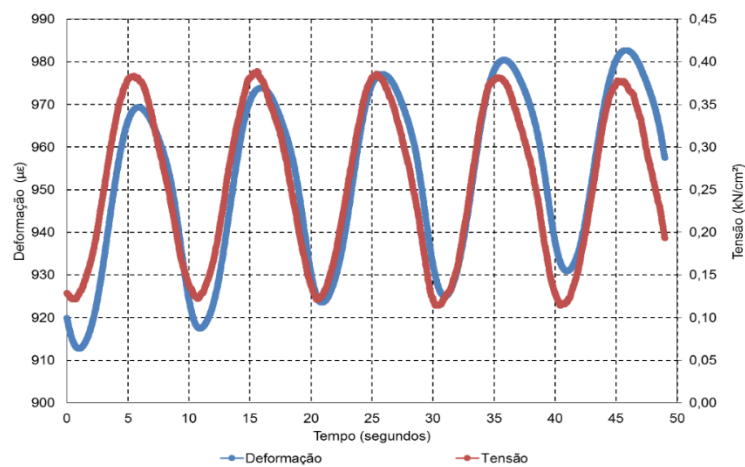


Figura 41: Sinal de tensão e deformação com filtro de média móvel

Para as baixas tensões e frequências não foi encontrado uma mudança expressiva no valores de módulo dinâmico e ângulo de fase, já o erro para a tensão apresentou uma redução de 0,3% e para a deformação uma redução de até 2,82%. A redução do erro não foi tão significativa como o esperado, porém no momentos da regressão para o sinal senoidal, o sinal filtrado se mostrou mais efetivo visualmente.

Após a filtragem foi realizado a regressão de 100% dos dados para um sinal senoidal utilizando a Equação 18 e Equação 19 do resultado dos últimos 5 ciclos de cada carregamento. Pellinen et al. (2003) em seu estudo consideraram este método um dos melhores para análise no domínio do tempo. A angularidade  $\beta$  presente no sinal de deformação corresponde a acumulação de deformações durante do carregamento, sendo o mesmo considerado uma função linear em função do tempo.

$$|\sigma^*| = \sigma_0 \sin(\omega * t + \pi) + \rho \quad \text{Equação 18}$$

$$|\varepsilon^*| = \varepsilon_0 \sin(\omega * t + \pi) + \rho + \beta * t \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

$\sigma_0$  = amplitude da tensão

$\varepsilon_0$  = amplitude da deformação

$\omega$  = velocidade angular

$\pi$  = fase do sinal

$\rho$  = deslocamento vertical

$\beta$  = angularidade

O melhor ajuste da regressão foi considerado aquele que obtesse o menor erro padrão [ $se(\sigma)$  e  $se(\varepsilon)$ ] dos parâmetros em análise. Para isso foi considerado o cálculo do erro padrão conforme adaptação de AASHTO T 342/11 (Equações Equação 20 e Equação 21)

$$se(\sigma) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \hat{\sigma}'_i - \sigma'_i \right)^2}{n-4}} \left( \frac{100}{\sigma_0} \right) \quad \text{Equação 20}$$

$$se(\varepsilon) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \hat{\varepsilon}'_i - \varepsilon'_i \right)^2}{n-4}} \left( \frac{100}{\varepsilon_0} \right) \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

$se(\sigma)$  = desvio padrão da tensão (%);

$\hat{\sigma}'_i$  = tensão prevista durante o ensaio no ponto  $i$ ;

$\sigma'_i$  = tensão corrigida pela regressão no ponto  $i$ ;

$\sigma_0$  = amplitude da tensão;

$se(\varepsilon)$  = desvio padrão da deformação (%);

$\hat{\varepsilon}'_i$  = deformação prevista durante o ensaio no ponto  $i$ ;

$\varepsilon'_i$  = deformação corrigida pela regressão no ponto  $i$ ;

$\varepsilon_0$  = amplitude da deformação;

$i$  = número do ponto;

$n$  = número de pontos total em análise;

Conforme a norma AASHTO T 342/11 os valores de erro padrão devem ser inferiores a 10%, porém ocorreram problemas de vibração das peças do atuador devido as mesmas serem muito esbeltas, bem como ajustes incorretos dos parâmetros PID, incapacidade de controle da servo-válvula, atuador e controles de fluxo hidráulico. Foram identificados erros superiores a 10% nas frequências de 25 e 10 Hz nas temperaturas de  $-10^{\circ}\text{C}$  e  $4^{\circ}\text{C}$  sendo assim permitido um erro de até 15%. Pellinen et al. (2003) já havia verificado que para os dados dos testes a 25Hz desviavam mais de uma onda senoidal perfeita em todas as temperaturas, sendo que na frequência de 0,1Hz os dados estavam mais próximos a uma senóide.

Uma hipótese de Pellinen et al. (2003) é que os melhores resultados podem ser obtidos pela determinação do ângulo de fase no "meio" da forma de onda, onde a máquina e os transdutores estão em um estado relativamente estável. Para utilização desta metodologia os sinais foram modificados para um estado estacionário e centralizado (Figura 42 e Figura 43) e então determinados os tempos dos sinais de tensão e deformação, sendo o ângulo de fase foi determinado pela Equação 8.

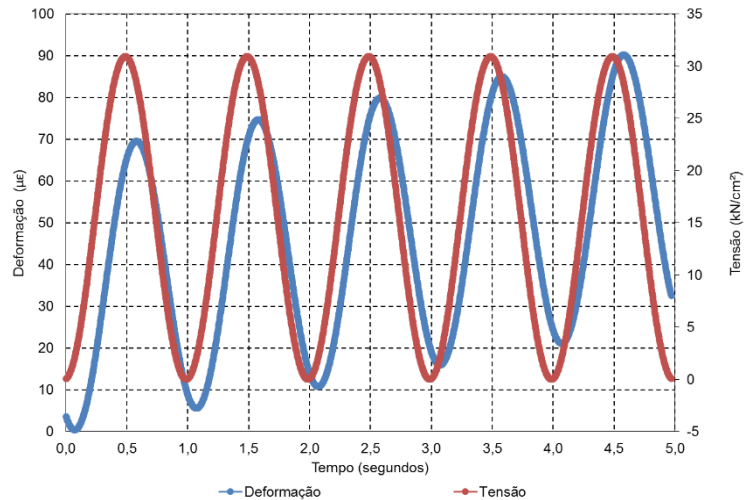


Figura 42: Sinal de tensão e deformação

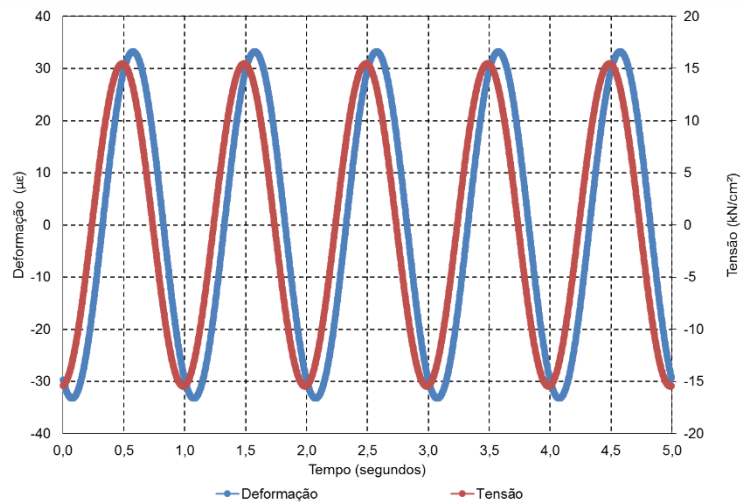


Figura 43: Sinal de tensão e deformação manipulados

Para verificação final da qualidade dos dados o espaço de Black foi traçado uma curva polinomial de segundo com o objetivo de encontrar um  $R^2$  mínimo de 0,90 na média dos resultados dos ensaios. O ajuste do plano Cole-cole também foi utilizado uma polinomial de segundo grau.

Para formação de curva mestra foi utilizado como modelo de sobreposição tempo-temperatura o princípio de WLF na temperatura de referência de 21°C. Como modelo de ajuste dos pontos da curva mestra para o módulo dinâmico foi utilizada uma ajuste sigmoidal (Equação 22), a qual foi modelada com o auxílio da ferramenta Solver do Microsoft Office Excel até encontrar a menor soma dos erros quadráticos obtido pela Equação 23, conforme recomendações de

Yusoff et al. (2011). Já a curva mestra do ângulo de fase foi ajustada utilizando uma polinomial de sexto grau.

$$SSE = \sum \frac{(\log |E^*|_{\text{exp}} - \log |E^*|_{\text{calc}})^2}{(\log |E^*|_{\text{exp}})^2} \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

SSE = somatório dos erros quadráticos;

$|E^*|_{\text{exp}}$  = módulo dinâmico obtido experimentalmente;

$|E^*|_{\text{calc}}$  = módulo dinâmico calculado pelo ajuste do modelo sigmoidal.

Também foi realizado a inferência a fadiga e deformação permanente das misturas estudadas com base nos dados experimentais. A correlação com a fadiga foi realizada com o parâmetro  $|E^*|/\text{sen}\varphi$  na temperatura de ensaio de 21°C. Já, para a análise de deformação permanente foi utilizada a correlação  $|E^*|.\text{sen}\varphi$  nas temperaturas de 37 e 54°C.

## 4. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, seguindo os procedimentos definidos na metodologia apresentada no capítulo 3. Foram utilizadas quatro misturas com os ligantes AB8, AMP 60/85, CAP 50/70 e CAP TLA com e sem adição de aditivo surfactante.

### 4.1. TEMPERATURAS DE MISTURA E COMPACTAÇÃO

As temperaturas foram obtidas conforme a viscosidade do ligante e seguindo a metodologia apresentada anteriormente. A Tabela 10 apresenta as temperaturas utilizadas.

Tabela 10: Temperatura do agregado, ligante e compactação

	AMP 60/85		CAP TLA		CAP 50/70		AB8	
	Quente	Morno	Quente	Morno	Quente	Morno	Quente	Morno
Agregados	175°C	145°C	168°C	138°C	163°C	133°C	185°C	155°C
Ligante	165°C	165°C	158°C	158°C	153°C	153°C	175°C	175°C
Compactação	155°C	125°C	149°C	119°C	140°C	110°C	175°C	145°C

### 4.2. LIGANTES ASFÁLTICOS

Foram realizados ensaios de adesividade pelo método visual através da norma DNER – ME 78/94. Para o ligante convencional 50/70 foi necessária a adição de 2% de cal para garantir a adesividade.

O resumo da caracterizações desses ligantes encontra-se na Tabela 11. O Apêndice 2 apresenta a caracterização completa realizada com o ligante puro e com o aditivo surfactante, com e sem envelhecimento em RTFOT.

Tabela 11: Propriedades dos cimentos asfálticos

Ensaio	Método	CAP 50/70	AMP 60/85	AB8	CAP TLA	Unidade
Viscosidade Brookfield a 135°C	NBR 15184	327,5	1220	-	747,5	cP
Viscosidade Brookfield a 150°C	NBR 15184	165	603	-	347	cP
Viscosidade Brookfield a 177°C	NBR 15184	61,5	222,5	1575	115	cP
Densidade de materiais betuminosos	NBR 6296	1,0091	1,0030	1,0237	1,0577	g/cm <sup>3</sup>
Ponto de amolecimento	NBR 6560	48	67	55	55	°C
Aumento do ponto de amolecimento após RTFOT	NBR 6560	2	6	5	6	°C
Penetração, 25°C, 100g	NBR 6576	61	59	64	34	0,1mm
Penetração retida após RTFOT	NBR 6576	1	0,76	0,8	49	%
Recuperação elástica, 25°C, 20 cm	NBR 15086	-	94	78	-	%
Porcentagem de recuperação elástica original a 25°C após RTFOT	NBR 15086	-	98	110	-	%
IST	-	-1,33	-	-	-	adm

A Figura 44 apresenta os resultados da viscosidade Brookfield dos ligantes asfálticos em função da temperatura de ensaio. Pode-se observar que para os ligante CAP 50/70 e AMP 60/85 não há uma alteração significativa da viscosidade com o aditivo surfactante. Já para o ligante CAP TLA há uma aumento da viscosidade, e para o AB8 o efeito é inverso, ocorre uma diminuição da viscosidade. Não é encontrado uma correlação única entre a viscosidade e a utilização de aditivo surfactante.

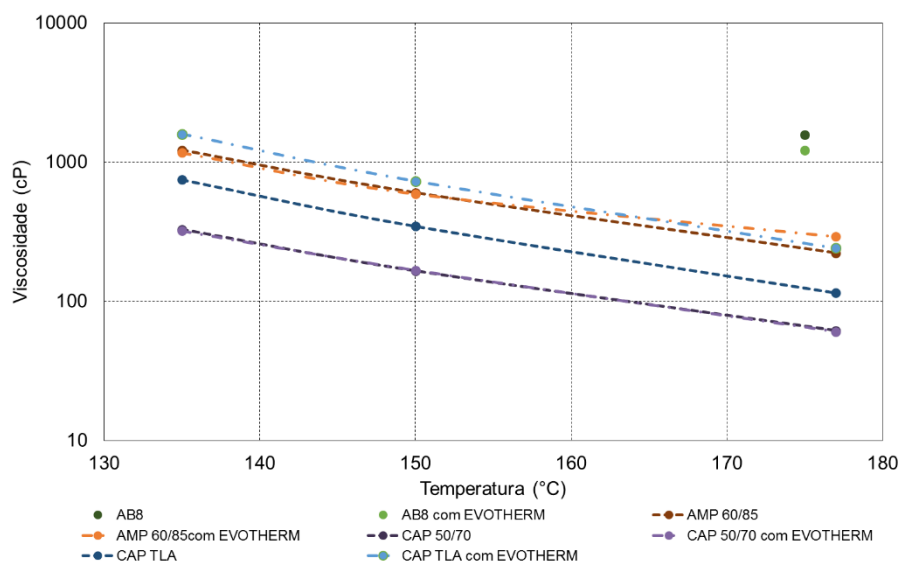


Figura 44: Viscosidade dos ligantes asfálticos

### 4.3. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A faixa granulométrica utilizada é a faixa C do DNIT ES 031/2006, exceto para a mistura com a adição de borracha tipo AB8, na qual foi utilizada a faixa Gap Graded do DNIT ES 112/2009. Para os ligantes AMP 60/85 e com TLA foi utilizada a mesma curva granulométrica, que está apresentada na Figura 45. Já, para o concreto asfáltico com CAP 50/70 foi necessária a utilização de 2% de cal na mistura para agir como melhorador da adesividade, entretanto foi imprescindível uma correção nas porcentagens de cada agregado (Figura 46). A faixa granulométrica utilizada com o ligante AB8 está apresentada na Figura 47. O resumo das porcentagens de cada agregado na curva granulométrica está apresentado na Tabela 12.

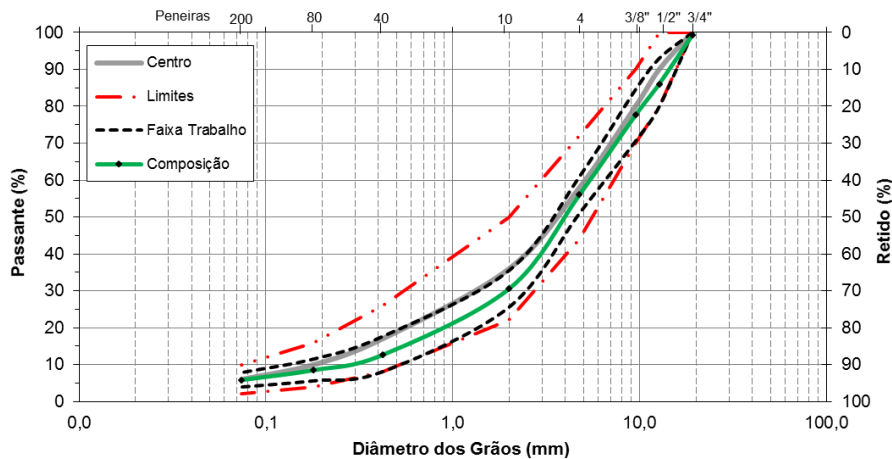


Figura 45: Faixa granulométrica utilizadas com AMP 60/85 e CAP TLA (Faixa C – DNIT)

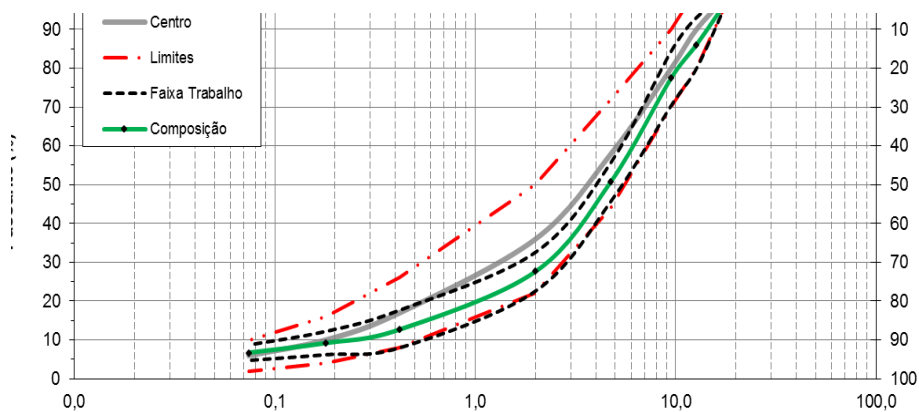


Figura 46: Faixa granulométrica utilizadas com CAP 50/70 (Faixa C – DNIT)



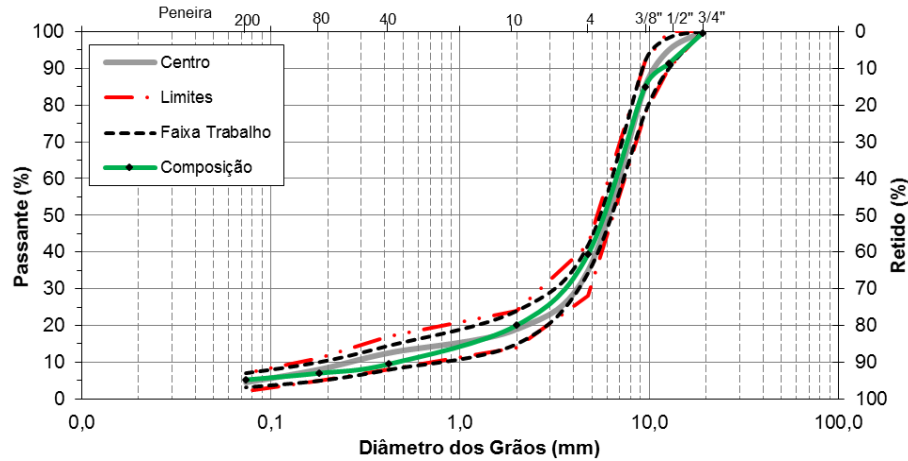


Figura 47: Faixa granulométrica utilizadas com AB8 (Gap graded- DNIT)

Tabela 12: Porcentagem de agregado em cada mistura

	Brita 3/4	Brita 3/8	Pó de pedra	Fíller (Cal)
AMP 60/85	24%	18%	58%	0%
CAP TLA	24%	18%	58%	0%
CAP 50/70	24%	24%	50%	2%
AB8	15%	47%	37%	1,5%

#### 4.4. DOSAGEM MARSHALL

Os gráficos referentes à dosagem estão apresentados no Apêndice 3. O resumo dos parâmetros finais obtidos durante o processo de dosagem está apresentado em Tabela 13 e Tabela 14.

Tabela 13: Resultados da dosagem com AMP 60/85, CAP TLA e CAP 50/70

Propriedade	DNIT - ES 031/2006 Capa	AMP 60/85		CAP TLA		CAP 50/70	
		Quente	Morno	Quente	Morno	Quente	Morno
Teor de Betume (%)	--	5,90	5,90	5,70	5,70	5,30	5,30
Volume de Vazios (%)	3 a 5	3,94	3,90	4,28	4,45	3,95	4,14
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	78,2	78,4	74,9	74,4	75,8	75,4
Vazios do Agregado Mineral (%)	> 15	18,2	18,2	17,2	17,3	16,6	16,8
Massa Esp. Max. Medida (kN/m <sup>3</sup> )	--	25,15	25,15	25,23	25,23	25,06	25,06
Massa Esp. Aparente (kN/m <sup>3</sup> )	--	24,17	24,16	24,13	23,98	24,59	24,06
Estabilidade (kgf)	> 500	1076	898	1235	933	1066	639
Fluência (1/100 in)	8 a 18	19,1	14,9	10,9	4,7	12,0	11,3
Relação Filler/Betume (%)	0,6 a 1,6 (Superpave)	0,99	0,99	1,03	1,03	1,27	1,27

Tabela 14: Resultados da dosagem com AB8

Propriedade	DNIT - ES 112/2009 Gap Graded	AB 8	
		Quente	Morno
Teor de Betume (%)	--	7,00	7,00
Volume de Vazios (%)	4 a 6	4,85	4,94
Relação Betume Vazios (%)	65 a 78	76,7	76,4
Vazios do Agregado Mineral (%)	14	20,9	20,9
Massa Esp. Max. Medida (kN/m <sup>3</sup> )	--	24,63	24,63
Massa Esp. Aparente (kN/m <sup>3</sup> )	--	23,42	23,41
Estabilidade (kgf)	> 700	911	546
Fluência (1/100 in)	--	14,7	13,8
Relação Filler/Betume (%)	0,6 a 1,6 (Superpave)	0,74	0,74

É possível observar que para todas as misturas quentes os parâmetros exigidos dentro do projeto de dosagem foram alcançados. A compactação entre a mistura quente e morna também não teve uma variação expressiva, se for analisado o volume de vazios obtidos utilizando a mesma energia de compactação. Os parâmetros de estabilidade foram atingidos para todas as misturas, exceto para a mistura morna com ligante AB8, porém a mesma atingiu o parâmetro de resistência a tração que é demonstrado no item a seguir, sendo a RT um parâmetro mais confiável de medida de resistência. A fluência também foi satisfatória para todas as misturas, exceto para o CAP TLA morno.

#### 4.5. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral estão apresentados na Figura 48. Para a mistura com ligante AB8 a especificação DNIT 112/2009 Gap Graded, determina uma RT maior que 0,5 MPa, e a especificação DNIT 031/2006 - Capa valores maiores que 0,65MPa para os projetos Faixa C.

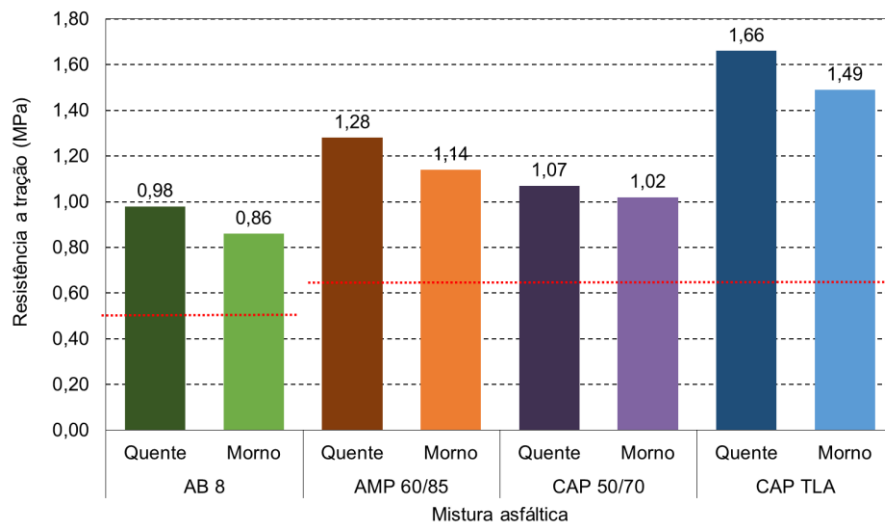


Figura 48: Resistência à tração por compressão diametral das misturas no teor de projeto

Pode-se observar que todas as misturas atingiram resistência à tração acima da exigida pela especificação, validando o teor de projeto selecionado. Os resultados para a mistura quente em sua maioria ficaram superiores a mistura morna, mostrando uma redução da resistência na mistura morna. Correlacionando as misturas é possível observar que a mistura com ligante AB8 foi a que apresentou os menores valores de resistência a tração devido a faixa granulométrica B ser menos resistente nesse parâmetro se não utilizado nenhum tipo de confinamento. Também é possível constatar que a mistura com CAP TLA apresenta uma rigidez superior ao das outras misturas, devido ao ligante apresentar menor penetração, ou seja, maior dureza.

#### 4.6. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Os resultados para o módulo de resiliência estão apresentados na Figura 49.

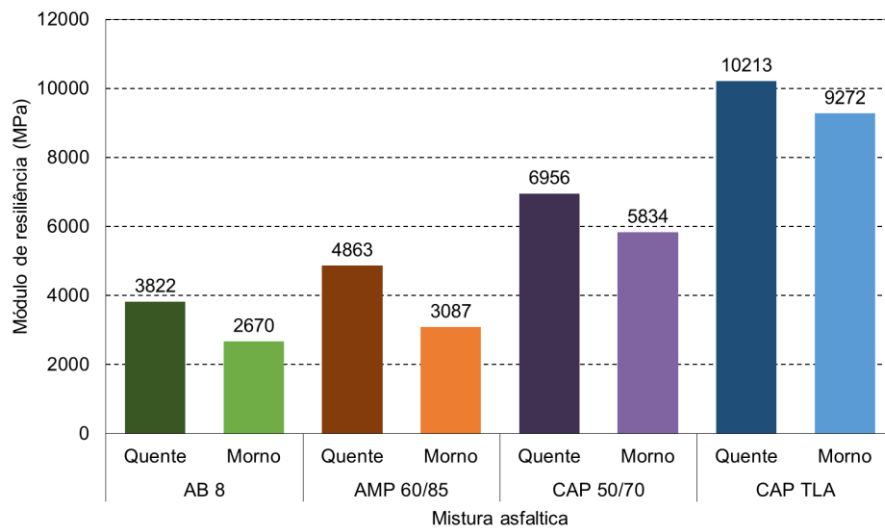


Figura 49: Módulo de resiliência das misturas no teor de projeto

Os resultados do módulo resiliência para as misturas mornas ficaram abaixo da mistura quente, mostrando assim que há uma alteração na rigidez da mistura asfáltica. Ainda, ressalta-se os valores elevados de módulo para a mistura com CAP TLA, superiores aos das outras misturas.

#### 4.7. DANO POR UMIDADE INDUZIDA

Os resultados para a resistência à tração retida das misturas estão apresentados na Figura 50. Os valores obtidos deveriam ser superiores a 80% conforme recomendação dos pesquisadores citados na metodologia.

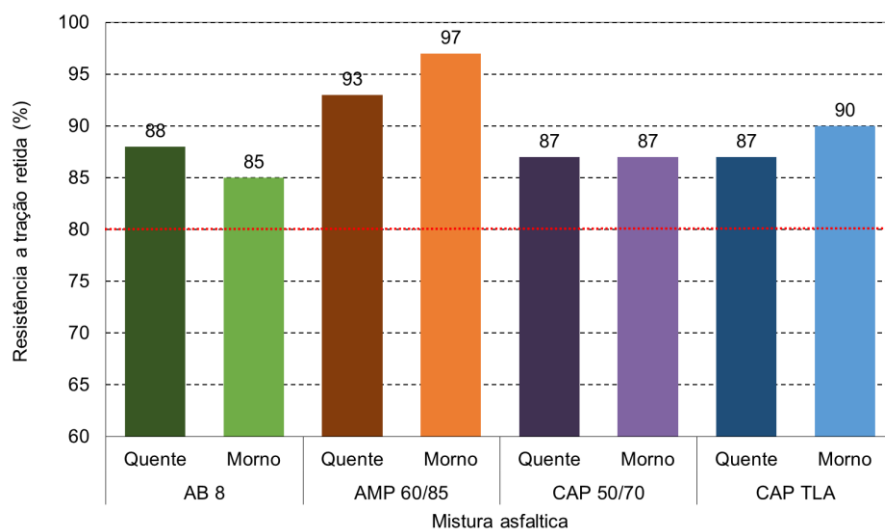


Figura 50: Resistência à tração retida no ensaio de dano por umidade induzida

Não é possível obter uma relação entre a adição do aditivo na mistura e uma melhora significativa na adesividade. Porém, todas as misturas estão com valor de resistência à tração retida acima da recomendada.

#### 4.8. ENSAIO DE MÓDULO DINÂMICO

O ensaio de módulo dinâmico foi realizado conforme metodologia do capítulo 3. As temperaturas de ensaios foram de -10, 4, 21, 37 e 54°C nas frequências de 25, 10, 5, 1, 0,5 e 0,1Hz.

##### 4.8.1. Propriedades volumétricas das amostras

A fim de testar em laboratório a metodologia discutida no capítulo anterior foram empregadas amostras compactadas no compactador giratório Superpave do Laboratório de Pavimentação da UFRGS. Os parâmetros de densidade aparente foram determinados conforme NBR 15573/12, e de densidade máxima medida através da NBR 15619/12. Também foi determinada a porcentagem de volume de vazios das amostras. As propriedades volumétricas dos corpos de provas utilizados nos ensaios de módulo dinâmico estão apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15: Propriedades volumétricas das amostras

Mistura		Nº CP	h (cm)	d (cm)	Densidade aparente (kN/m <sup>3</sup> )	Densidade máx. medida (kN/m <sup>3</sup> )	Volume de vazios (%)
AB 8	Quente	7	14,91	10,00	2,330	2,453	5,0
		8	14,89	10,00	2,327	2,453	5,1
		11	15,02	10,00	2,310	2,453	5,8
		13	14,98	10,00	2,319	2,453	5,5
	Morno	10	14,91	10,00	2,313	2,453	5,7
		11	14,90	10,00	2,321	2,453	5,4
		13	14,96	10,00	2,313	2,453	5,7
	14	14,97	10,00	2,334	2,453	5,0	
AMP 60/85	Quente	9	14,95	10,00	2,390	2,515	5,0
		10	14,97	10,00	2,386	2,515	5,1
		12	14,97	10,00	2,389	2,515	5,0
		13	14,92	10,00	2,381	2,515	5,3
	Morno	9	14,95	10,00	2,382	2,515	5,3
		10	14,95	10,00	2,388	2,515	5,1
		11	14,94	10,00	2,366	2,515	5,9
CAP 50/70	Quente	8	14,84	10,00	2,358	2,506	5,9
		9	14,85	10,00	2,361	2,506	5,8
		10	14,95	10,00	2,367	2,506	5,6
	Morno	9	14,95	10,00	2,362	2,506	5,7
		11	14,83	10,00	2,376	2,506	5,2
		15	14,92	10,00	2,370	2,506	5,4
		17	14,90	10,00	2,365	2,506	5,6
CAP TLA	Quente	7	14,91	10,00	2,374	2,523	5,9
		8	14,91	10,00	2,374	2,523	5,9
		10	14,91	10,00	2,382	2,523	5,6
	Morno	6	14,94	10,00	2,383	2,523	5,5
		7	14,93	10,00	2,385	2,523	5,5
		10	14,90	10,00	2,381	2,523	5,6

#### 4.8.2. Módulo dinâmico e ângulo de fase

Nos itens a seguir são apresentados a representação dos resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase no espaço de Black, plano Cole-Cole, curva mestra para o módulo dinâmico e ângulo de fase. Primeiramente são apresentados os resultados de uma mesma mistura com e sem aditivo surfactante, e por último um resumo com todas as misturas utilizadas no estudo, para permitir a análise da influência do ligante, granulometria e da adição do surfactante no comportamento viscoelástico das misturas.

Os resultados médios de módulo dinâmico e ângulo de fase para as misturas estudadas estão apresentados no Apêndice 4, bem como os valores de desvio padrão dos sinais de tensão e deformação.

#### 4.8.2.1. Espaço de Black

O espaço de Black é a representação do logaritmo do módulo dinâmico em função do ângulo de fase. Esta representação semi-log permite que sejam melhor analisados/visualizados os dados em altas temperaturas. Bem como no plano complexo, o espaço de Black também permite mostrar a relação de independência da temperatura e frequência dos parâmetros de módulo dinâmico e ângulo de fase.

Segundo Kim (2009) o espaço de Black e o plano Cole-Cole podem ser também utilizados para aferir a qualidade dos dados de teste. Por este motivo foram plotados nos gráficos do Espaço de Black os pontos de todas as amostras, para que seja possível observar a dissipação dos dados.

Sobre os resultados obtidos nos ensaios, é possível observar que até a temperatura de 21 à 37°C há um aumento do ângulo de fase, e depois uma queda do mesmo para todas as misturas, exceto a com ligante CAP TLA, onde esta inversão ocorre na transição dos 37°C para os 54°C. Com relação ao módulo dinâmico ele vai diminuindo com o aumento da temperatura, comportamento característico das misturas asfálticas.

As Figura 51, Figura 52, Figura 53 e Figura 54 apresentam o ajuste polinomial de segundo grau no espaço de Black para cada mistura separadamente. Pode-se observar que em geral as misturas mornas apresentam um aumento nos valores do ângulo de fase, exceto para a mistura com ligante CAP 50/70 onde esta diferença é quase insignificante. Isso mostra que em geral as misturas mornas estudadas tendem a ser mais viscosas do que as que não possuem aditivo.

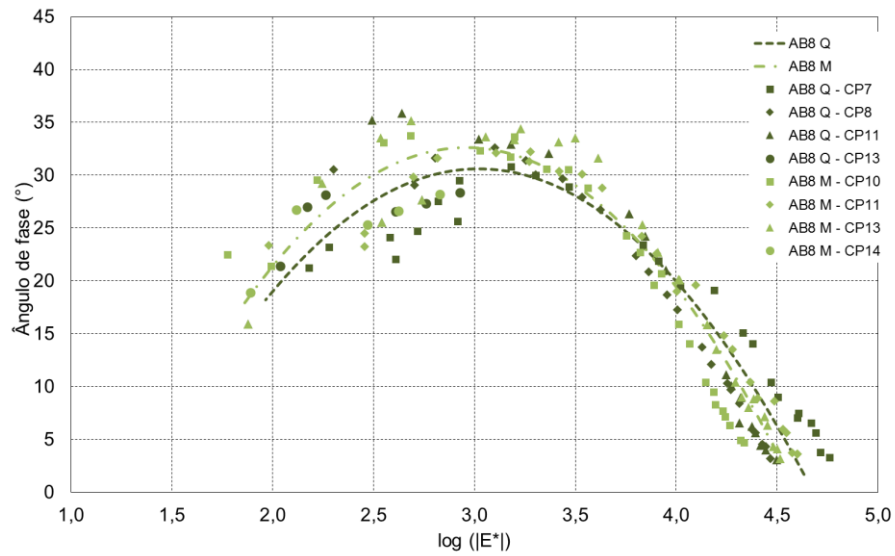


Figura 51: Espaço de Black para as misturas com AB8

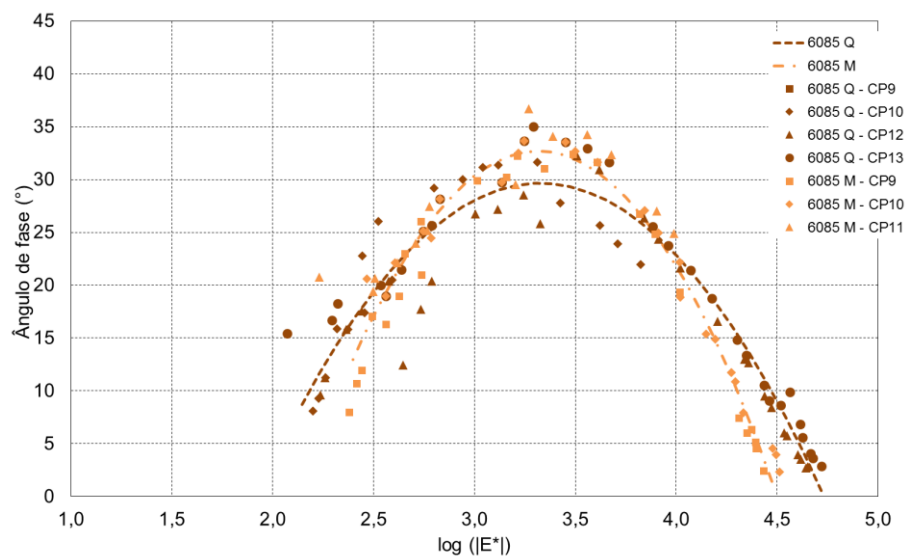


Figura 52: Espaço de Black para as misturas com AMP 60/85



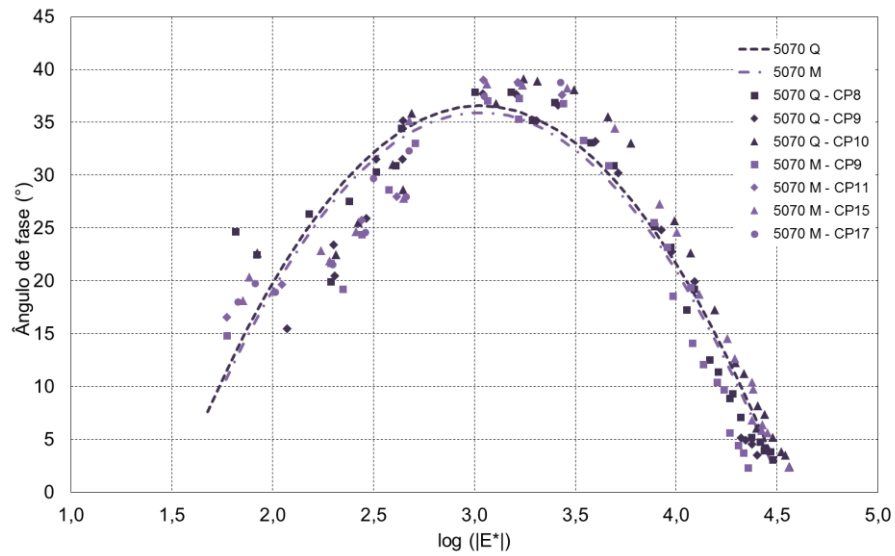


Figura 53: Espaço de Black para as misturas com CAP 50/70

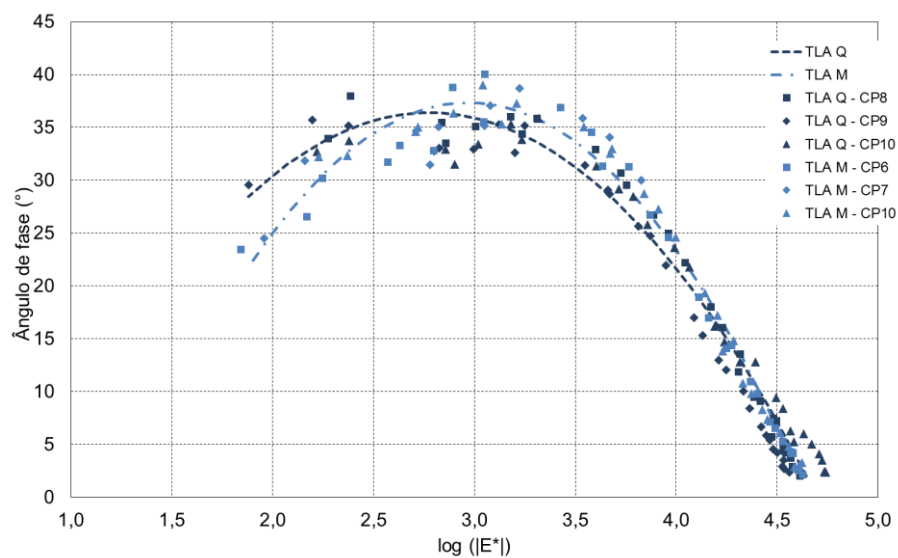


Figura 54: Espaço de Black para as misturas com CAP TLA

A dissipação dos dados é mais evidente nas misturas com modificados por polímeros. Também pode-se observar que a curva dos valores médios com o ajuste da polinomial de segundo grau apresenta um bom ajuste.

Comparando todas as misturas na Figura 55 nota-se a influência do ligante nas propriedades viscoelásticas das misturas.

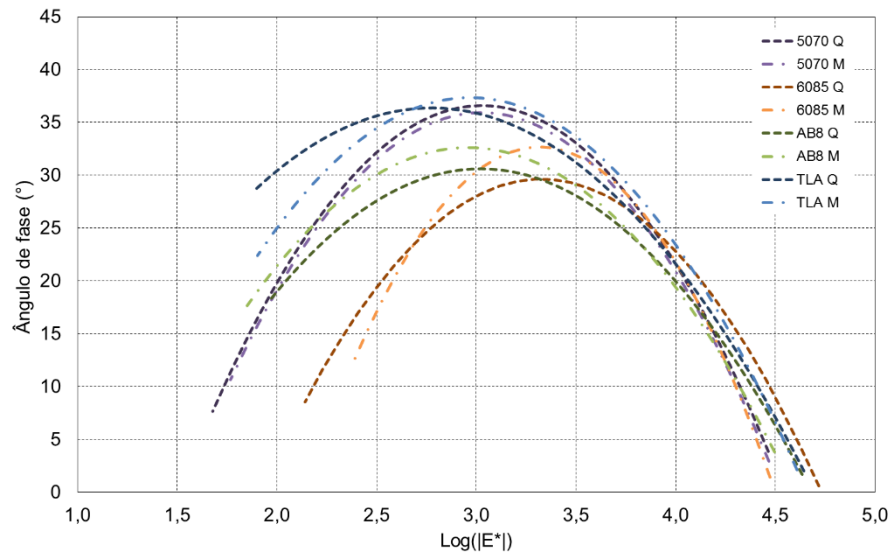


Figura 55: Espaço de Black para todas as misturas

A mistura com ligante AMP 60/85 apresenta os menores ângulo de fase, demonstrando assim que a adição do polímero auxilia na fase elástica da mistura asfáltica. Assim como, a mistura com ligante AB8 onde apresentou ângulo de fase inferiores aos das outras misturas.

A mistura com CAP TLA apresentou ângulo de fase próximo as do ligante convencional 50/70, porém com módulos mais elevados. Essas duas misturas possuem uma parcela viscosa mais predominante.

#### 4.8.2.2. Plano Cole-Cole

O plano Cole-cole representa o módulo de perda ( $E_2$ ) em função do módulo de armazenamento ( $E_1$ ). Este tipo de representação torna-se importante por apresentar a energia dissipada e armazenada pela mistura asfáltica.

A redução dos valores de  $E_2$  representam uma redução do comportamento viscoso irreversível a energia dissipada em relação a mistura quente, ou seja, ao se deformar apresenta um maior retorno as condições iniciais e maior capacidade de atenuação dos esforços aplicados. Já com os valores  $E_1$  pode-se analisar a parte recuperável, ou seja, elástica.

Entre as Figura 56 a Figura 59 estão apresentados os ajustes polinomiais de segundo grau no plano Cole-cole para cada uma das misturas estudadas. É possível observar que as misturas mornas apresentam menor concavidade, assim tendo menores valores de  $E_2$  e  $E_1$ .

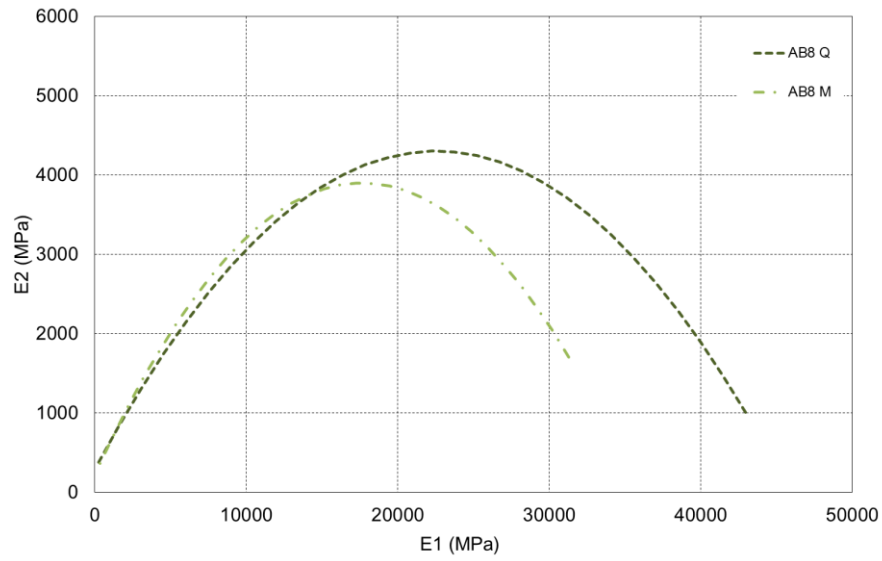


Figura 56: Plano Cole-cole para as misturas com AB8

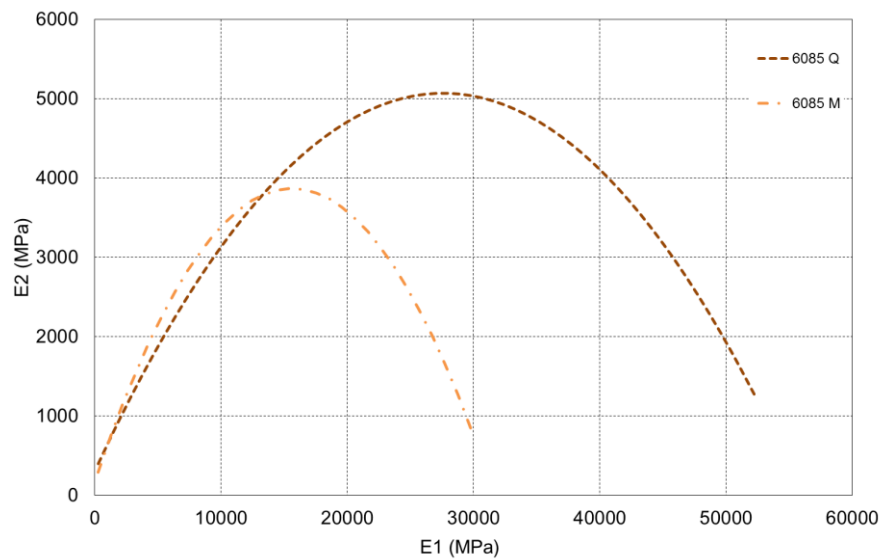


Figura 57: Plano Cole-cole para as misturas com AMP 60/85

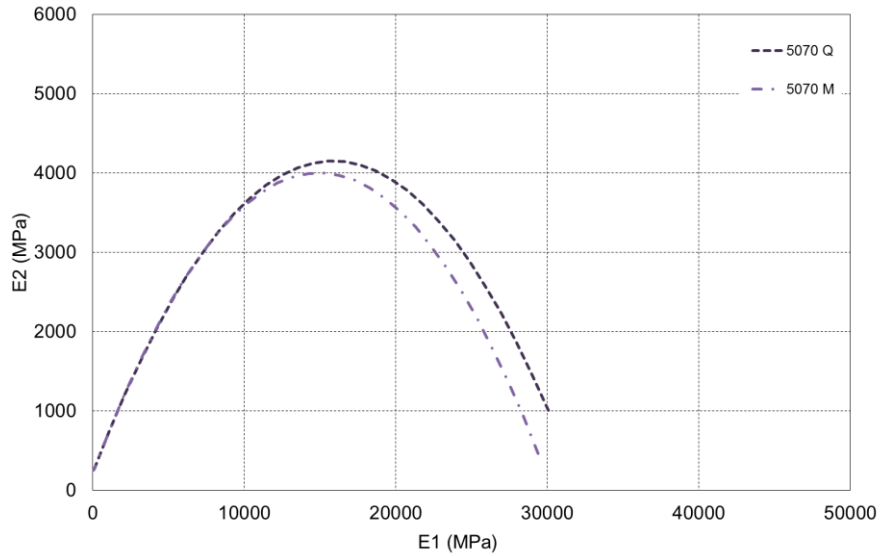


Figura 58: Plano Cole-cole para as misturas com CAP 50/70

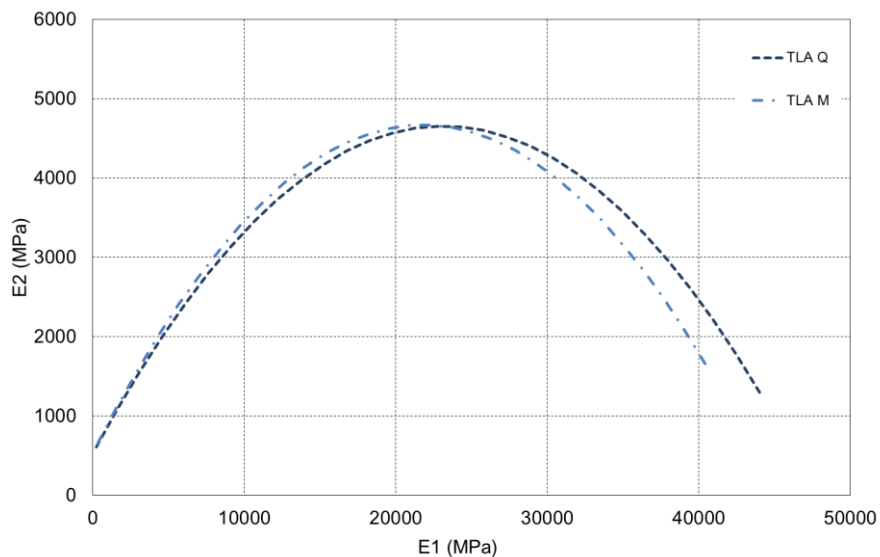


Figura 59: Plano Cole-cole para as misturas com CAP TLA

A atenuação dos valores de E1 e E2 comparando as misturas convencionais e mornas é menos perceptível nas misturas com CAP TLA e CAP 50/70, e mais acentuada nas misturas com adição de polímero. A Figura 60 apresenta o plano Cole-Cole para todas as misturas utilizadas no estudo.

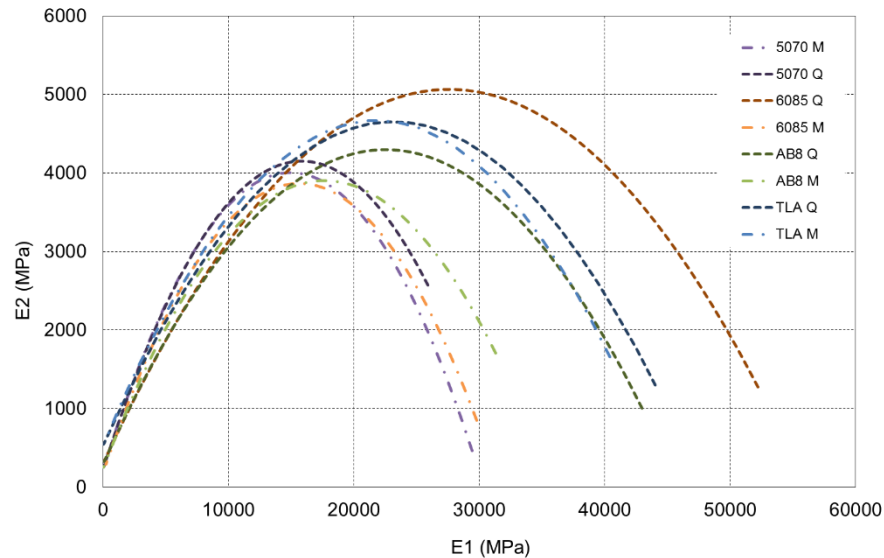


Figura 60: Plano Cole-cole para as todas as misturas

As misturas mornas possuem menor comportamento viscoso ( $E_2$ ), bem como, menor comportamento elástico ( $E_1$ ) mantendo valores próximos ao da mistura quente com CAP 50/70, mostrando que adição de surfactante altera as propriedades viscoelástica da mistura, tornando seu comportamento mais próximo a mistura com ligante convencional, exceto para as misturas com CAP TLA. A mistura com AMP 60/85 quente foi a que apresentou comportamento mais viscoso, seguido do CAP TLA quente. Porém o CAP TLA quente assim como o AB8 quente apresentam maior fase elástica.

As misturas mornas, por possuírem menor concavidade no plano Cole-Cole possuem maior capacidade de atenuação dos esforços, ocorrendo assim um menor acionamento dos agregados para suportar as cargas ao qual o pavimento é submetido.

#### 4.8.2.3. Curva mestra do módulo dinâmico

As curvas mestras do módulo dinâmico apresentam uma caracterização geral da rigidez da mistura asfáltica em relação a frequência de aplicação de carga e temperatura de ensaio. Para esta análise é utilizado o princípio da superposição tempo-temperatura, sendo a temperatura de referência  $21^{\circ}\text{C}$  e ajuste sigmoidal da curva.

As misturas asfálticas apresentam um comportamento típico onde o módulo cresce com o aumento da frequência. Nas altas frequências ocorre um pequeno tempo de carregamento sendo possível observar um comportamento elástico do material. Já nas baixas frequências o comportamento é oposto, onde é possível observar as deformações viscoelásticas do material.

Sobre o desempenho da mistura asfáltica as baixas frequências estão relacionadas a ocorrência de deformação permanente, já as frequências intermediárias estão relacionadas ao dano por fadiga

As Figura 61 à Figura 64 apresentam o ajuste sigmoidal das curvas mestras do módulo dinâmico para as misturas utilizadas na pesquisa. Pode-se observar que não há uma mudança expressiva do módulo dinâmico das misturas mornas em relação as convencionais.

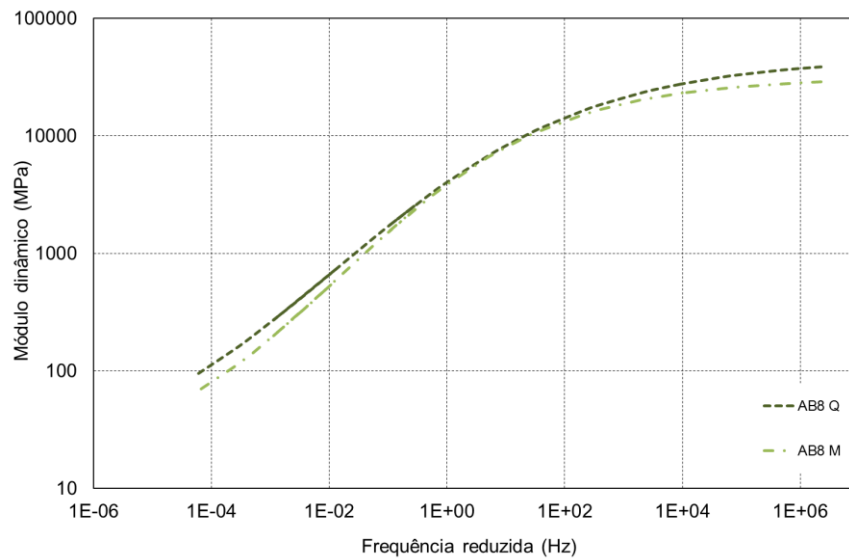


Figura 61: Curva mestra para as misturas com AB8

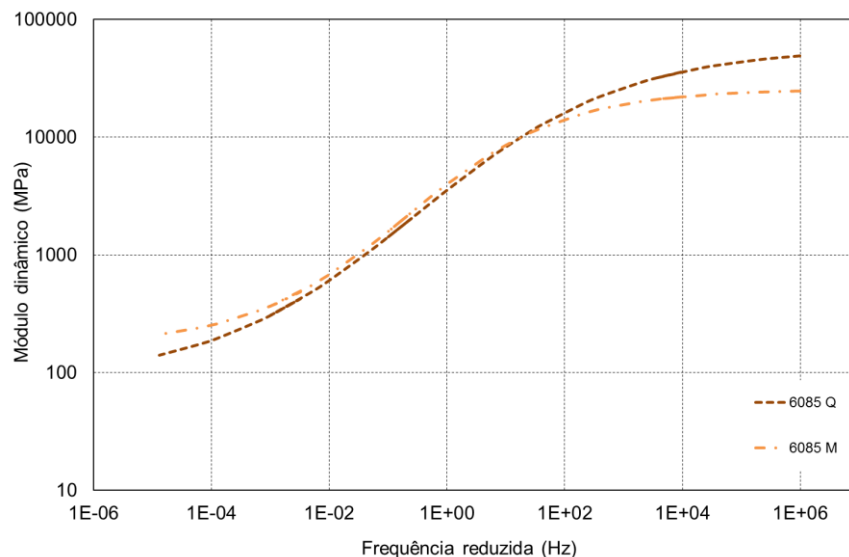


Figura 62: Curva mestra para as misturas com AMP 60/85

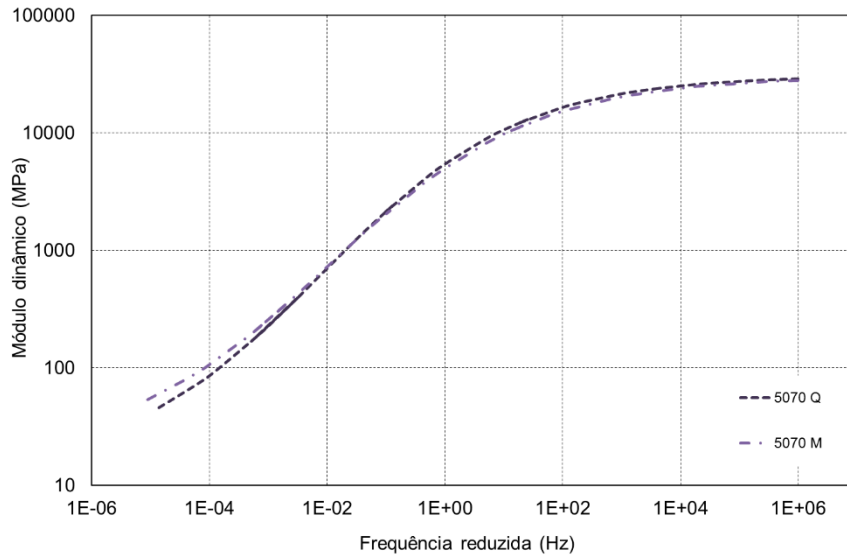


Figura 63: Curva mestra para as misturas com CAP 50/70

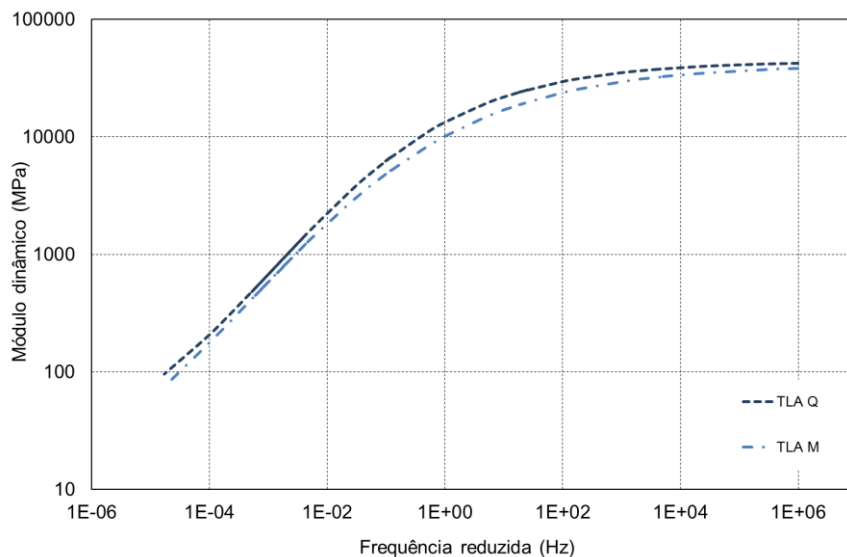


Figura 64: Curva mestra para as misturas com CAP TLA

Para as misturas com ligante AB8 e CAP TLA os valores de módulo dinâmico da mistura morna encontram-se ao longo da curva sempre abaixo dos valores da mistura quente. Já para a mistura com ligante convencional foram encontrados valores menores de módulo dinâmico nas altas frequências e maiores nas maiores frequências. E para a com ligante AMP 60/85 também foram encontrados valores de módulo dinâmico superiores nas altas frequências, sendo que os mesmos se aproximam dos valores da mistura quente para as baixas frequências. Estes dados corroboram com os resultados de módulo de resiliência onde os valores para as misturas mornas foram inferiores ao da mistura convencional.

A Figura 65 apresenta a curva mestra para todas as misturas em análise. É possível observar que a mistura com CAP TLA apresenta uma rigidez superior ao das outras misturas, isso se deve ao ligante CAP TLA ser um ligante mais duro, ou seja, com menor penetração.

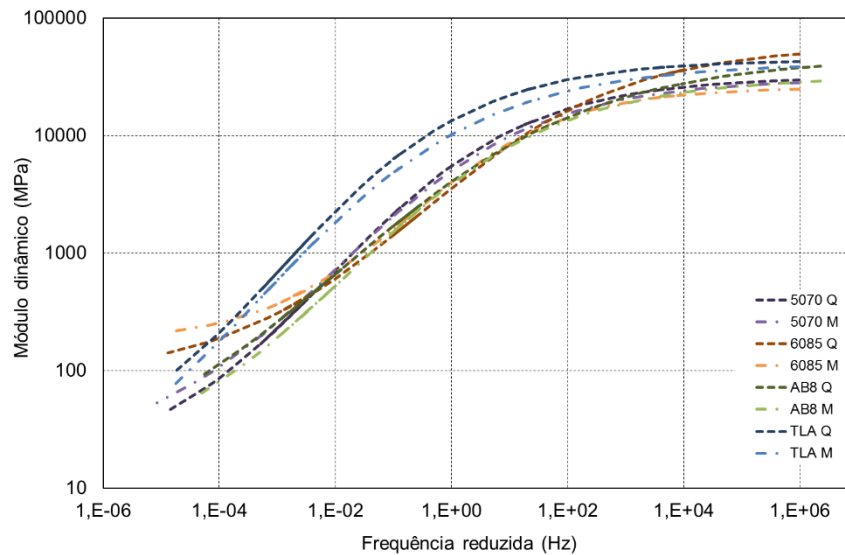


Figura 65: Curva mestra para todas as misturas

Realizando a análise das altas frequências (Figura 66) é possível observar novamente que o CAP TLA possui uma rigidez superior a partir das altas frequências para as duas misturas. Já para as outras misturas quentes os valores são superiores da mistura morna, sendo que os valores de módulo da mistura morna apresentam valores muito próximos. Isso mostra que o aditivo surfactante altera a fase elástica da mistura asfáltica, como também pode ser verificada no Plano Cole-cole.



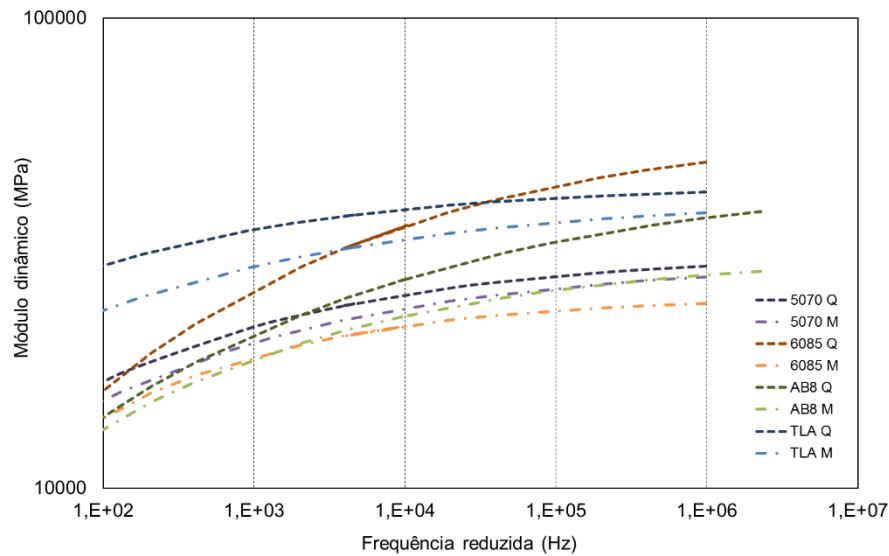


Figura 66: Curva mestra para todas as misturas nas altas frequências

Já para as frequências médias (Figura 67) comportamento das misturas mornas fica bem mais próximo ao da mistura convencional, mostrando assim, que o comportamento à fadiga em relação as misturas com e sem aditivo não devem possuir uma variação expressiva.

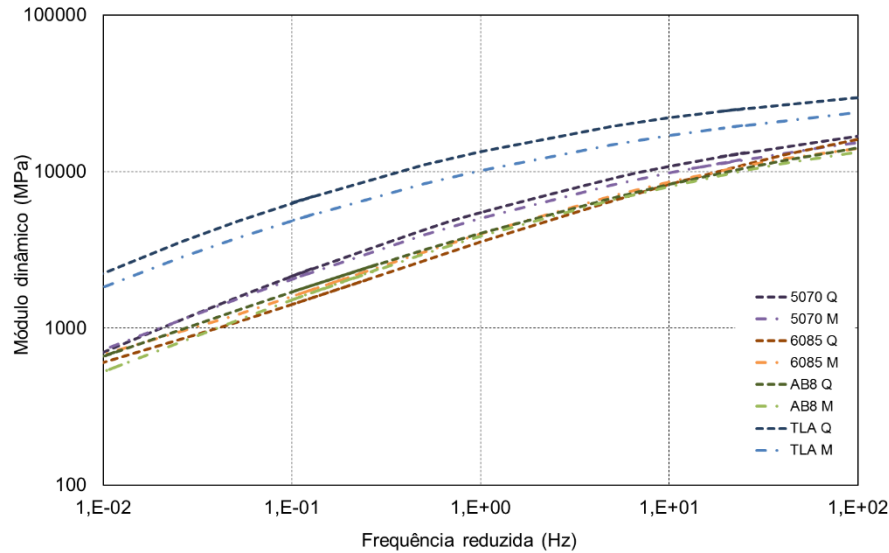


Figura 67: Curva mestra para todas as misturas nas médias frequências

A Figura 68 apresenta o resultado da curva mestra do módulo dinâmico nas baixas frequências. O comportamento entre as misturas mornas e quentes se mantém próximo. Já sobre a faixa granulométrica é possível constatar que a mistura com faixa B e ligante AB8 apresenta uma redução dos valores de módulo dinâmico, não sendo este o comportamento esperado, já que a granulometria Faixa B apresenta um maior atrito interno, devendo elevar o módulo. Outros

autores já haviam concluído que nas baixas frequências e altas temperaturas o comportamento referente a granulometria era mais expressivo, porém neste estudo não foi possível observar tais alterações de comportamento. Almeida Junior (2016) já havia constatado que nos ensaios de módulo complexo o fator que mais alterava a rigidez é o ligante asfáltico.

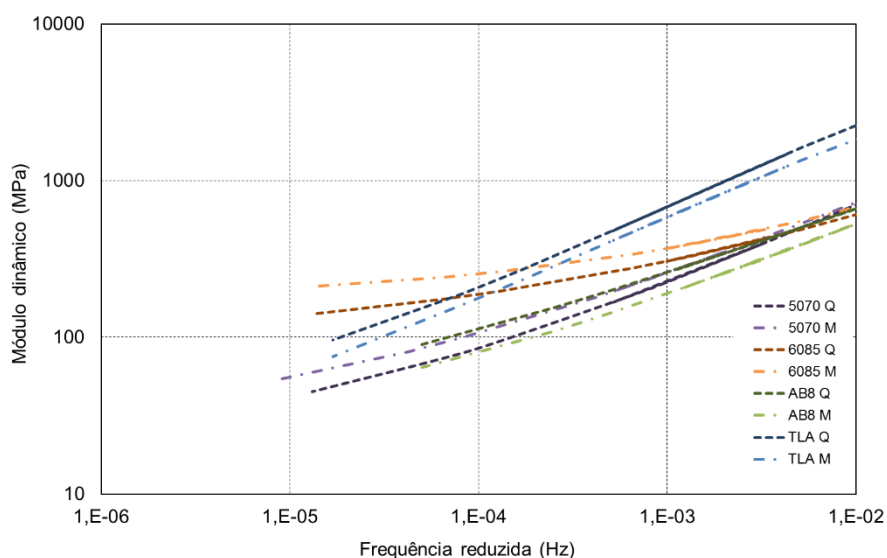


Figura 68: Curva mestra para todas as misturas nas baixas frequências

A Tabela 16 apresenta os parâmetros do ajuste sigmoidal das curvas em estudo. Pode-se destacar que a mistura com ligante AMP 60/85 apresentou os maiores valores de módulo em baixíssimas frequências, mostrando ter uma rigidez considerável até em altas temperaturas. Os valores de  $E_0$  e  $E_\infty$  para as misturas mornas estão sempre inferiores ao valores da mistura de referência, representando uma perda na rigidez da mistura asfáltica causada pelo aditivo surfactante em baixas e altas temperaturas e frequências.

Tabela 16: Parâmetros de ajuste do modelo sigmoidal

Parâmetros	AB8		AMP 60/85		CAP 50/70		CAP TLA	
	Quente	Morno	Quente	Morno	Quente	Morno	Quente	Morno
$E_0$	11,6	13,3	84,3	171,6	13,2	18,4	13,2	3,9
$E_\infty$	46329	31500	57930	25525	31582	30306	44240	41443
$\delta$	1,06	1,12	1,93	2,23	1,12	1,26	1,12	0,59
$\alpha$	3,60	3,37	2,84	2,17	3,38	3,22	3,53	4,03
$\beta$	-0,88	-1,00	-0,29	-0,53	-1,23	-1,14	-1,76	-1,72
$\gamma$	0,46	0,55	0,56	0,75	0,60	0,58	0,61	0,52
$\delta+\alpha$	4,67	4,50	4,76	4,41	4,50	4,48	4,65	4,62

O valor de  $\beta$  representa a translação da curva em relação ao eixo x (frequência reduzida). Não é possível observar um comportamento padrão entre as misturas quentes e mornas. Entre as misturas pode-se destacar que os valores mais negativos de  $\beta$  para o ligante CAP TLA representam sua maior susceptibilidade térmica ou cinemática. Já o contrário ocorre para as misturas com o ligante AMP 60/85, no qual se observa um menor parâmetro  $\beta$  e consequentemente uma menor susceptibilidade cinemática.

O parâmetro  $\gamma$  é a inclinação da curva, sendo que todas as misturas representaram valores próximos apresentando um desvio padrão de 6%.

#### 4.8.2.4. Curva mestra do ângulo de fase

Entre a Figura 69 e Figura 72 apresentam as curvas mestras para o ângulo de fase. Pode-se observar que em geral os valores de ângulo de fase para as misturas mornas são superiores as da mistura convencional, caracterizando assim um material mais viscoso. Essa alteração mostra como o aditivo surfactante altera as propriedades viscosas da mistura asfáltica.

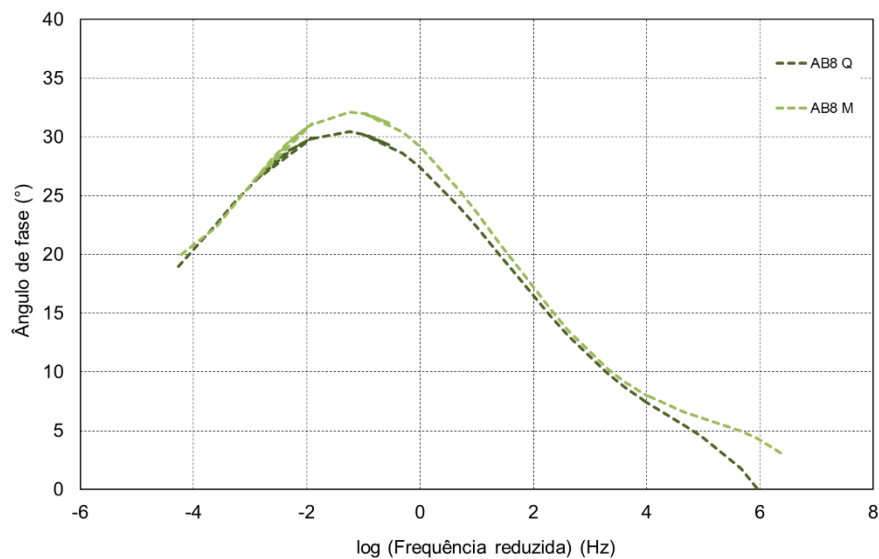


Figura 69: Curva mestra do ângulo de fase para as misturas com AB8

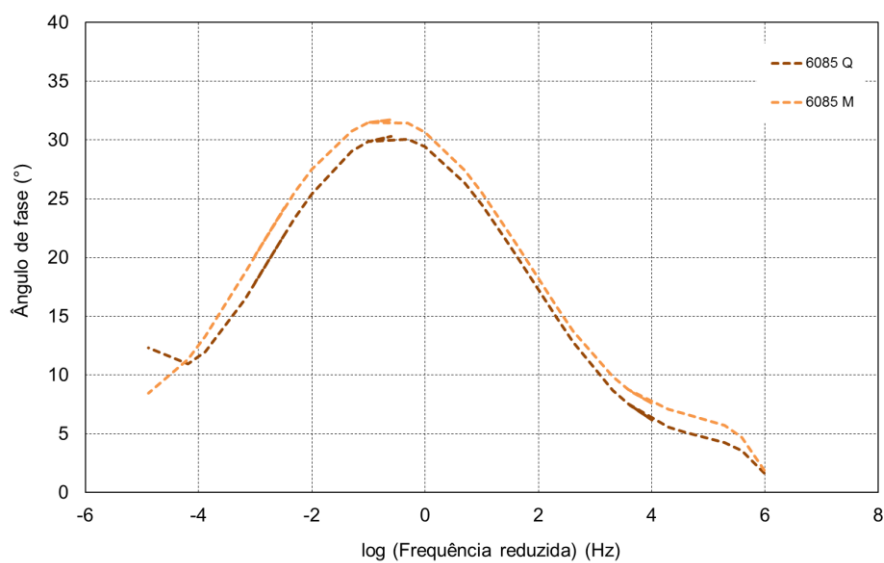


Figura 70: Curva mestra do ângulo de fase para as misturas com AMP 60/85

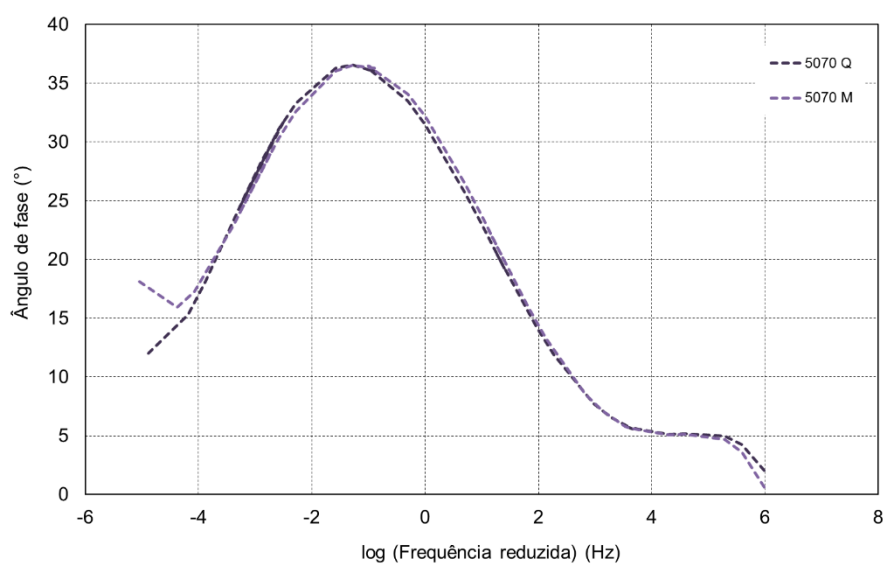


Figura 71: Curva mestra do ângulo de fase para as misturas com CAP 50/70

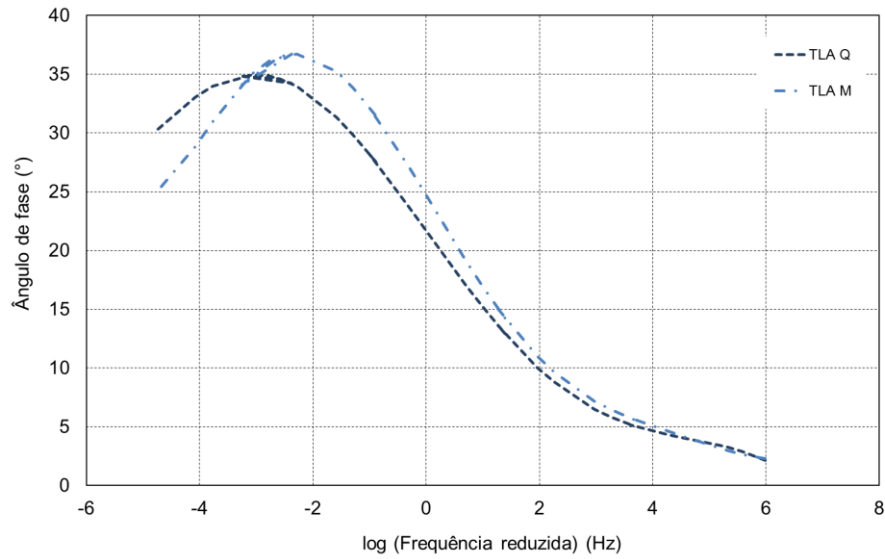


Figura 72: Curva mestra do ângulo de fase para as misturas com CAP TLA

Analisando todas as misturas em um único gráfico (Figura 73) é possível constatar que os ligantes CAP TLA e CAP 50/70 são os que possuem parâmetros mais viscosos. As maiores alterações com relação ao ângulo de fase entre a mistura quente e morna aparecem na mistura com CAP TLA. As misturas com adição de polímero apresentaram menores ângulos de fase, representando uma maior fase elástica, o que é característico para misturas este tipo de ligante asfáltico.

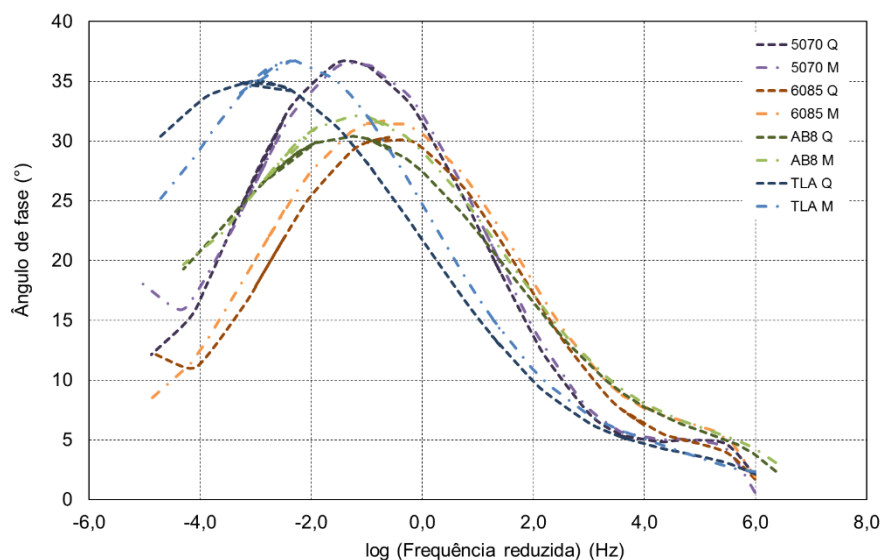


Figura 73: Curva mestra do ângulo de fase para todas as misturas

Analisando as altas frequências da curva mestra do módulo dinâmico (Figura 74) é possível observar que o CAP TLA é o que possui os menores valores de ângulo de fase, representando

um comportamento mais elástico. Já as misturas com CAP 50/70 e AMP 60/85 apresentam comportamento intermediário. A mistura com AB8 apresentou os maiores valores de ângulo de fase nessas frequências, representando um comportamento mais viscoso. As misturas mornas mantiveram valores próximos ao das misturas de referência.

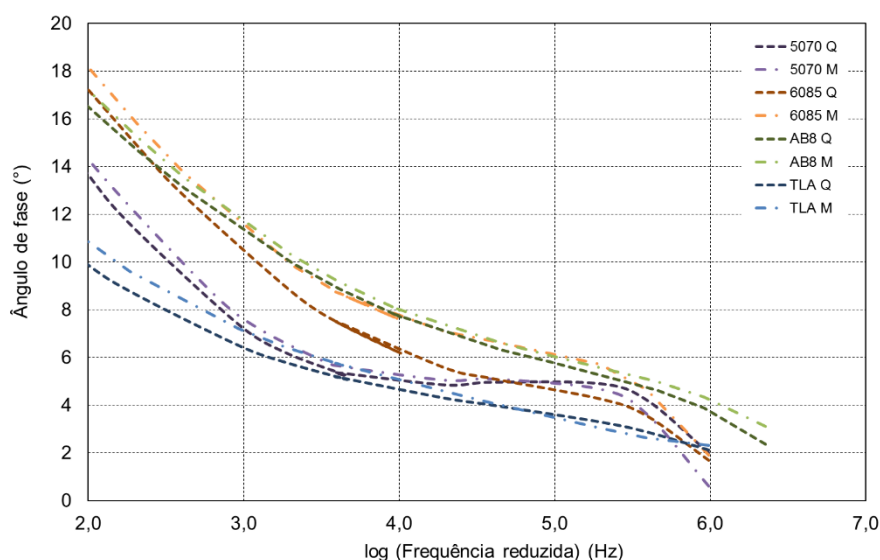


Figura 74: Curva mestra do ângulo de fase nas altas frequências

Nas médias frequências (Figura 75) os valores de ângulo de fase sofrem uma alteração, e desta vez o CAP 50/70 foi o que apresentou os maiores valores, representando um comportamento mais viscoso, como já era esperado para um ligante convencional. Já o CAP TLA possui uma curva mais a esquerda do gráfico, se mostrando assim menos suscetível termicamente, bem como, menos susceptível a carregamento mais lentos, mantendo seu ângulo de fase inferior ao encontrado nas outras misturas para uma mesma frequência. Os ligantes com adição de polímero obtiveram valores próximo e menores do que o ligante convencional, caracterizando um comportamento mais elásticos nas medias temperaturas e frequências, podendo assim resultar em melhor desempenho a fadiga, o que já é esperando para mistura com adição de polímero. As misturas mornas mantiveram valores de ângulo de fase sempre superiores aos das misturas de referência.

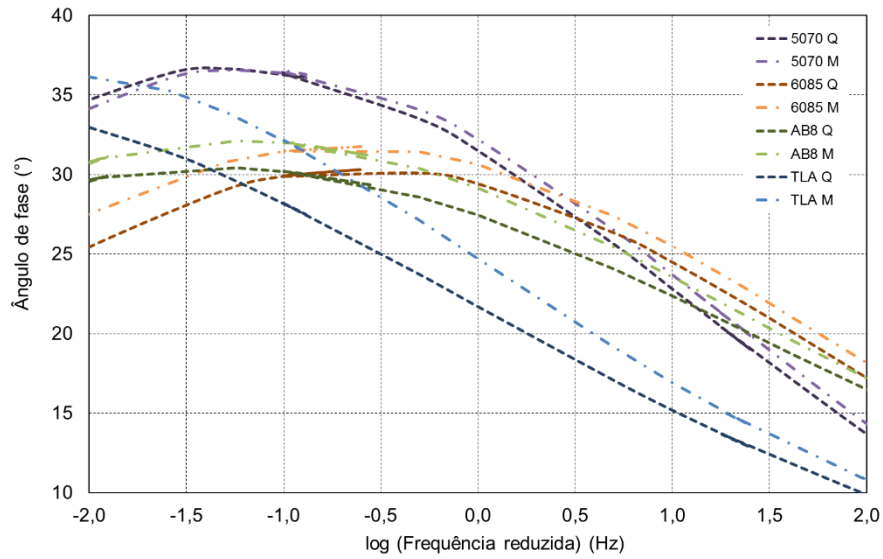


Figura 75: Curva mestra do ângulo de fase na frequência média

Nas baixas frequências (Figura 76) o ligante convencional CAP 50/70 apresentou uma maior inclinação, mostrando assim uma maior susceptibilidade térmica as altas temperaturas. A mistura com CAP TLA apresentou os maiores ângulos de fase o topo da curva encontra-se próximo do início do gráfico, ou seja na frequência de 0,01Hz. Com relação a adição de polímero pode-se observar que as duas misturas possuem curvaturas parecida, porém defasadas.

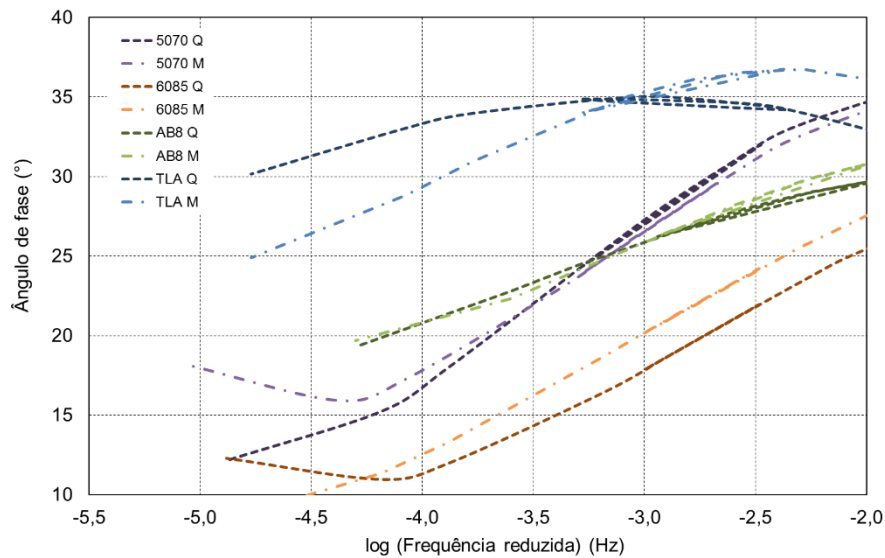


Figura 76: Curva mestra do ângulo de fase nas baixas frequências

#### 4.8.2.5. Inferência a fadiga e deformação permanente

A Figura 77 apresenta a função do fator de fadiga em relação a frequência de ensaio na temperatura de 21°C. Os menores valores de  $|E^*| \cdot \text{sen}\phi$  são os que apresentam um melhor comportamento a fadiga.

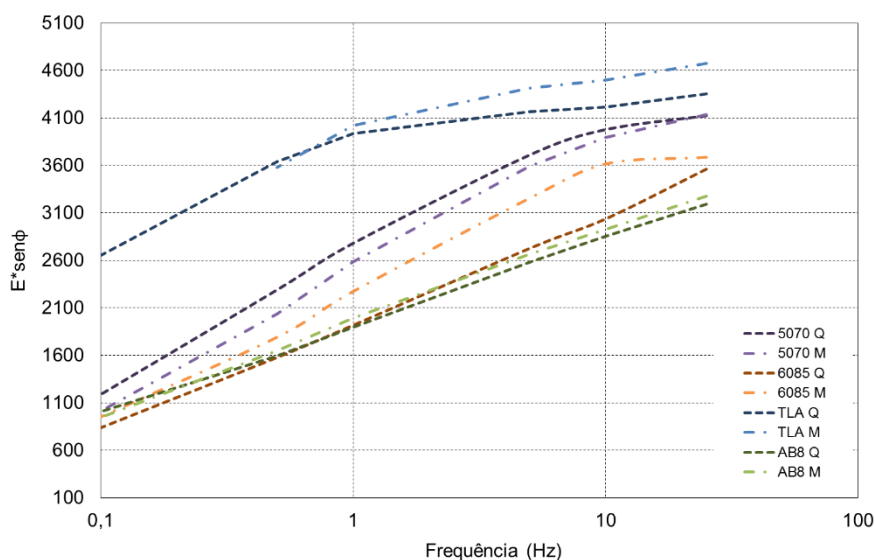


Figura 77: Inferência a fadiga para todas as misturas na temperatura de 21°C

É possível observar que as misturas com polímero são as que apresentam o melhor comportamento a fadiga, o que já era esperado pela indicação das bibliografias. O CAP TLA apresentou um inferência ao comportamento da fadiga inferior ao da mistura convencional. Já as misturas mornar não seguem um padrão de comportamento em relação a mistura convencional. Porém pode-se constatar que a maior variação entre as misturas com e sem aditivo ocorre na mistura com ligante AMP 60/85, onde a mistura morna apresenta um comportamento inferior a fadiga.

A Figura 78 apresenta os valores do fator de deformação permanente em função da frequência na temperatura de 54°C. Porém os resultados se mostram confusos, supostamente devido ao equipamento funcionar próximo a carga mínima durante os ensaios. Por isso a Figura 79 apresenta os resultados para a temperatura de 37°C. A análise deve ser realizada de modo que os maiores valores de  $|E^*|/\text{sen}\phi$  são os que apresentam melhor comportamento a deformação permanente.



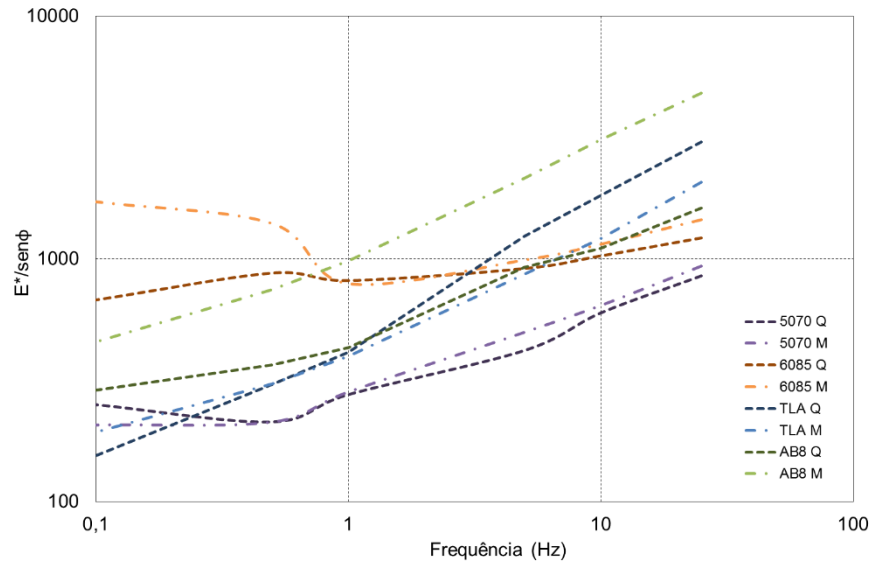


Figura 78: Inferência a deformação permanente para todas as misturas na temperatura de 54°C

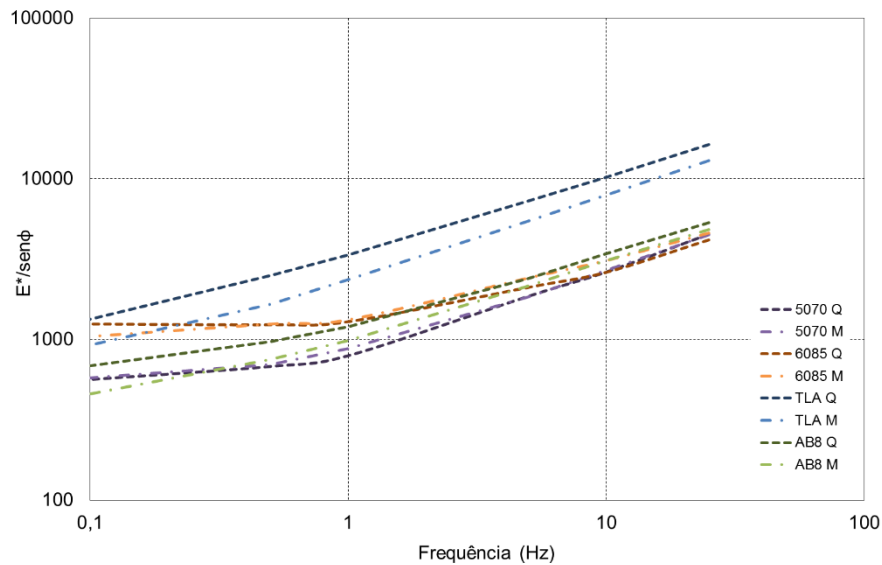


Figura 79: Inferência a deformação permanente para todas as misturas na temperatura de 37°C

Como já esperando o ligante convencional foi o que apresentou o pior comportamento a deformação permanente, seguido das misturas com adição de polímero. A mistura com TLA apresentou um valor superior de  $|E^*|/\text{sen}\phi$  em relação as outras misturas, prevendo assim um comportamento superior a deformação permanente. Já as misturas mornas não apresentaram um padrão de comportamento em relação a mistura de referência.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo não apresentadas as conclusões obtidas pela pesquisa que teve como objetivo obter parâmetros viscoelásticos de misturas asfálticas quentes e mornas comumente utilizada em rodovias do Rio Grande do Sul. Também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1. CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas no capítulo anterior é possível concluir que:

- As misturas mornas apresentam uma redução da rigidez em relação a mistura convencional, isso pode ser constatado com ensaios de resistência a tração e módulo de resiliência.
- Através dos ensaios de adesividade de dano por umidade induzida não foi possível constatar uma melhora considerável da adesividade das misturas asfálticas mornas estudadas.
- Constatou-se que as misturas mornas apresentam valores de ângulo de fase superiores ao da mistura de referência, representando assim um comportamento mais viscoso dessas misturas, ou seja uma maior propensão a deformação irreversíveis.
- Sobre os valores de módulo dinâmico a mistura quente e morna não apresentam mudanças significativas, sendo que em sua grande maioria as misturas mornas apresentam-se com valores um pouco inferiores ao da mistura quente.
- No plano Cole-Cole pode-se observar as maiores diferenças entre as misturas quentes e mornas. Exceto para a mistura com CAP TLA, as misturas mornas apresentam menor concavidade neste plano, representando assim uma maior atenuação dos esforços, representando assim uma modificação tanto na fase elástica quanto na fase viscosa.
- A mistura com CAP TLA apresentou uma rigidez superior em relação as outras misturas em todos os ensaios realizados. Essa mistura também se mostrou menos susceptível termicamente e para carregamentos lentos.

- A mistura com CAP 50/70 foi a que apresentou a menor variação de comportamento entre a mistura convencional e a morna, tanto para os valores de ângulo de fase, como de módulo dinâmico. Percebe-se que a interação entre os ligantes modificados e o aditivo surfactante são diferentes do que para a mistura convencional.
- As misturas com adição de polímero apresentam uma maior fase elástica, ou seja menores ângulos de fase, o que já era esperado para essas misturas devido a adição de polímero. Os resultados também mostraram um interação diferente deste tipo de ligante com aditivo surfactante utilizado, apresentando as maiores diferenças de comportamento entre a mistura de referência e a morna. Essas misturas também apresentaram melhor comportamento a fadiga, quando realizada a inferência.
- A inferência a fadiga nas misturas mornas não apresentam um padrão de comportamento com relação a mistura de referência, sendo que as misturas com melhor comportamento a fadiga, quando realizada a inferência.
- Com relação à inferência a deformação permanente a mistura com ligante convencional 50/70 apresentou o pior comportamento. As misturas com polímero apresentaram comportamento intermediário e a com CAP TLA apresentou valores superiores. Sendo que as misturas mornas não apresentam um padrão de comportamento com relação a mistura de referência.

## 5.2. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de dar continuidades a esse estudo, sugere-se:

- Revisar peças esbeltas utilizadas nos ensaios de módulo dinâmico para reduzir a vibração e conseqüentemente o ruído dos sinais.
- Analisar o uso da ferramenta *Dynamic Properties Monitor* presente no equipamento MTS 810 para interpretação dos dados do ensaio de módulo dinâmico.
- Realizar a adaptação de comando com *Feedback* para realização do ensaio de módulo dinâmico sem a utilização de teste de carga antes do ensaio.

- Analisar outras ligante asfálticos modificado o aditivo surfactante para avaliar o comportamento mecânico dessas misturas em relação a modificação.
- Realizar ensaios de deformação permanente para as misturas estudadas com o intuito de ver a relação com a mistura quente e morna.
- Realizar ensaios de fadiga com as misturas estudadas, para prever a relação entre misturas quentes e mornas.
- Analisar o comportamento em campo de misturas quentes e mornas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA JÚNIOR, P. O. B. **Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Santa Maria, RS, 2016.

AMARAL, S. da C. **Estudos de misturas asfálticas densas com agregados do estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (Betuflex B 65/60).** Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Transportes. São Carlos, SP, 2011.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 342/11:** Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures. Washington, DC, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3497:** Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures. Philadelphia, 1995.

ARCHILLA, A. R.; CORRALES-AZOFEIFA, J. **Effects of Confinement on the Dynamic Modulus of Hot Asphalt Mixtures and Interaction with Binder/Fiber Combinations and Air Voids.** TRB 2016 Annual Meeting. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15086:** Materiais Betuminosos - Determinação da Recuperação Elástica pelo Ductilômetro. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15087:** Misturas asfálticas — Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184:** Materiais Betuminosos - Determinação da Viscosidade em Temperaturas Elevadas Usando um Viscosímetro Rotacional. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15573:** Misturas asfálticas — Determinação da densidade aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15617:** Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15619:** Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16018:** Misturas asfálticas — Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida, Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16081**: Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6296**: Produtos betuminosos semi-sólidos - Determinação da massa específica e densidade relativa. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água, Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6560**: Materiais Betuminosos - Determinação do Ponto de Amolecimento - Método do Anel e Bola. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6576**: Materiais Asfálticos - Determinação da Penetração. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

BENNERT, T. **Evaluation of Warm Asphalt Technology**. New Jersey Department of Transportation. Draft Report. Trenton, New Jersey, 2010.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica – formação básica para engenheiros**. 1ª ed. (3ª reimpressão) Rio de Janeiro: PETROBRÁS, Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2008.

BRITO, L. A. T. **Avaliação e Análise Paramétrica do Ensaio de Compressão Diametral sob Cargas Repetidas em Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2006.

BRUXEL, D. F. **Estudo do comportamento viscoelástico de concretos asfálticos convencionais e modificados através de ensaio de laboratório e de análise de desempenho**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Centro de tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Santa Maria, RS, 2015.

BUSS, A.; RASHWAN, M.; WILLIAMS, R. C. **Investigation of Warm-Mix Asphalt Using Iowa Aggregates**. Iowa Department of Transportation. Final Report. Ames, Iowa, 2011.

CENTOFANTE, R. **Estudo laboratorial da utilização de material fresado em misturas asfálticas recicladas a quente**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Santa Maria, RS, 2015.

CHOWDHURY, A.; BUTTON, J. W. **A Review of Warm Mix Asphalt**. Texas Transportation Institute. Technical Report. College Station, Texas, 2008.

CLYNE, T. R.; Li, X.; Marasteanu, M. O.; Skok, E. L. **Dynamic and resilient modulus of Mn/DOT asphalt mixtures**. Minnesota Department of Transportation. Final Report. St. Paul, Minnesota, 2003.

COLPO, G. B. **Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaio de flexão em viga quatro pontos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 133**: Determinação do módulo de resiliência de misturas betuminosas. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 043**: Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 35**: Agregados - Determinação da Abrasão *Los Angeles*. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 54**: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER–ME 78**: agregado graúdo: adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 84**: Agregados Miúdos- Determinação da Densidade Real. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 86**: Agregados - Determinação do Índice de Forma. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-NM 30**: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/2006 - ES**: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 112/2009 - ES**: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 135/2010**: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136/2010 - ME**: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DI BENEDETTO, H.; OLARD, F.; SAUZÉAT, C.; DELAPORTE, B. **Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: from binders to mixes. Road Materials and Pavements Design**. Département Génie Civil et Bâtiment (URA CNRS), Ecole Nationale des TPE, France, 2004

DI BENEDETTO, H.; PARTL, M. N.; FRANCKEN, L. FRANCKEN; DE LA ROCHE, C. **Stiffness testing for bituminous mixtures**. RILEM TC 182-PEB Performance testing and Evaluation of bituminous materials. Materials and Structures, Vol. 34, 2001, pp 66-70.

DOUGAN, C. E\* - **Dynamic Modulus - Test Protocol – Problems and Solutions**. Connecticut Department of Transportation in Cooperation with the U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. University of Connecticut, USA, 2003.

ESTAKHRI, C.; BUTTON, J.; ALVAREZ, A. E. **Field and laboratory investigation of warm mix asphalt in Texas**. Texas Transportation Institute. College Station, Texas, 2010.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 12697-26**: Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness. Brussels, 2004.

HURLEY, G. C.; PROWELL, B.D. **Field Performance of Warm Mix Asphalt**. TRB 2008 Annual Meeting. 2008.

KIM, Y.R. **Modeling of Asphalt Concrete**. North Carolina: McGraw-Hill Professional, 2009. 460p. ISBN: 007146462X

KLINSKY, L. M. G; de FARIA, V. C.; BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, R. **Revestimentos asfálticos sustentáveis: Estudo do comportamento mecânico e de redução de emissões de misturas asfálticas mornas**. Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Relatório Final. 2014.

MELLO, L. G. R. **O Estudo do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas**. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Brasília, DF, 2008.

MELO, J. V. S. de. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, SC, 2014.

MOMM, L. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, SP, 1998.

MOTTA, R.; BERNUCCI, L.; VASCONCELLOS, P.; FARIA, V.; LEAL, J. F. **Laboratory and Field Evaluation of Warm Mix Asphalt in Brazil**. TRB 2014 Annual Meeting. 2014.

MTS Systems Corporation. **318 Load Unit Product Information**. 2014.

MTS Systems Corporation. **Axial Extensometers Product Information**. 2009.

MTS Systems Corporation. **FlexTest GT Test Controller**. 2009.

MTS Systems Corporation. **MTS Model 793.10 MultiPurpose TestWare®- User Information and Software Reference**. 2015.

MTS Systems Corporation. **Series 505 SilentFlo™ Hydraulic Power Unit Product Information**. 2010.

MTS Systems Corporation. **Series 651 Environmental Chambers**. 2016.

MTS Systems Corporation. **Tuning and Calibration**. 2009.



NASCIMENTO, L. A. H DO. **Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil.** Dissertação (Doutorado em filosofia) - Faculty of North Carolina State University. Transportation Materials. Raleigh, North Carolina – USA, 2015.

NASCIMENTO, L. A. H DO. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente.** Dissertação(mestrado) –Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE. Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

NASCIMENTO, L. A. H DO; ROCHA, S. M. N.; NASCIMENTO, C. E. H. DO; KIM Y. R.; CHACUR, M.; MARTINS, A. T. **Uso da mecânica do dano contínuo na caracterização de misturas asfálticas brasileiras.** 21º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, RJ, 2014.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM . **Research Results Digest 370** - Guidelines for Project selection and materials sampling, conditioning, and testing in WMA research studies. Washington, 2012.

OTTO, G. G. **Misturas Asfálticas Mornas – Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo.** 2009.164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina.

PAZOS, A. G. Efeito de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas. Dissertação(mestrado) –Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE. Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

Pellinen, T.; Crockford, B. **Comparison of analysis techniques to obtain modulus and phase angle from sinusoidal test data.** 6th RILEM Symposium PTEBM'03, Zurich, 2003.

RĂCĂNEL, C.; BURLACU, A. **Development of master curves for asphalt mixtures used in Romania.** 5<sup>th</sup> International Conference Bituminous Mixtures and Pavements, Thessaloniki, Greece, 2011.

THEISEN, K. M. **Aplicação do princípio da correspondência elasto-viscoelástica para previsão de deformabilidade de misturas asfálticas.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, RS, 2006.

THEISEN, K. M. **Estudo de parâmetros constitutivos extraídos de dados experimentais no comportamento de misturas asfálticas.** Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, RS, 2011.

UNDERWOOD, B. S. **Multiscale Constitutive Modeling of Asphalt Concrete.** Dissertação (Doutorado em filosofia) - Faculty of North Carolina State University. Civil Engineering. Raleigh, North Carolina – USA, 2011.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Relatório final - Ingevity/Evothem®: **Desempenho das misturas asfálticas mornas utilizando a tecnologia evotherm com e sem o uso do compactador giratório.** Porto Alegre, RS, 2015.

XIE, Z.; SHEN, J.; LI, B; EARNEST, M. **Dynamic Modulus ( $E^*$ ) of Stone Matrix Asphalt (SMA) with Crumb Rubber Modifier (CRM)**. TRB 2015 Annual Meeting. 2015.

YUSOFF, N. I. M.; CHAILLEUX, E.; AIREY, G. **A Comparative Study of the Influence of Shift Factor Equations on Master Curve Construction**. International Journal of Pavement Research and Technology. Vol.4 No.6. 2011

ZAUMANIS , M.; OLESEN, E.; HARITONOV, V. **Laboratory Evaluation of Warm Mix Asphalt Properties**. 5<sup>th</sup> International Conference Bituminous Mixtures and Pavements. Thessaloniki, Greece, 2011.

ZUBARAN, M.; MOTTA, L. M. G. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto**. 42<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação (RAPv) e 18<sup>o</sup> Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR). Foz do Iguaçu, PR, 2015.

## APÊNDICE 1

Procedimento de ensaios para equipamento MTS

## PROCEDIMENTO PARA ENSAIO DE MÓDULO DINÂMICO UNIAXIAL

O ensaio de módulo dinâmico, cuja rotina é descrito neste procedimento, segue as recomendações da AASHTO T 342/2011. O procedimento descrito é válido para uma prensa MTS 810 UTM.

### 1. RISCOS E SUGESTÕES DE SEGURANÇA

A operação do equipamento MTS pode envolver perigos para o operador. Alguns itens podem ser ressaltados:

- Nunca desativar os *interlocks*;
- Utilizar valores de *interlocks* mínimos, para que não haja dano da amostra ou instrumentos;
- Quando não for necessário a utilização de pressão, desativar a HPU;
- Sempre verificar se as peças estão bem pressas;
- Não utilizar o canal *displacement* externo como controlador de carregamento;
- Não se ausentar das proximidades do equipamento enquanto o ensaio ou testes estiverem acontecendo;
- Em caso de emergência ativar um dos botões de segurança;

É de responsabilidade do usuário estabelecer práticas de segurança e de saúde adequadas e determinar a aplicabilidade das limitações reguladoras antes da utilização.

### 2. ROTINA NO MPT

O *MultiPurpose testware* (MPT) é um aplicativo de teste avançado de design disponíveis para o controlador MTS 793. O mesmo é utilizado no desenvolvimento de rotinas para aplicação no equipamento MTS. Com *MultiPurpose testware*, é possível:

- Criar modelos de teste complexos que incluem comandos, aquisição de dados, detecção de eventos, e instruções de controle externo;
- Adquirir e monitorar dados de tendência ou fadiga em tempo real.

A rotina no MPT inclui os comandos:

Informações do operador (*Operator Information*): Este processo requer que o operador digite e insira informações em um momento específico durante o ensaio. A informação é arquivada juntamente com outros dados durante o ensaio. Neste ensaio ele é utilizado para armazenar informações sobre a amostra a ser ensaiada.

Evento do operador (*Operator Event Process*): Permite que o operador alterar o progresso de teste através do uso de botões personalizados em um painel de controle especial. É útil para lembrar o operador de determinados eventos de teste.

Aquisição de dados cíclicos (*Cyclic Acquisition*): Registra a saída de todos os sinais selecionados no intervalo de tempo especificado ou taxa de amostragem definido, sendo possível especificar os segmentos ou ciclos a partir do qual o processo adquire dados. A Figura Apêndice 1.1 apresenta o processo de aquisição de dados, onde 1 é os pontos de dados e 2 é o intervalo de tempo.

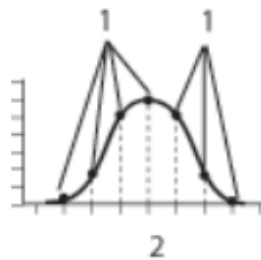


Figura Apêndice 1.1: Processo de aquisição de dados

A aquisição de dados deve ser significante superior a frequência de carregamento, para que se possa obter um grande número de pontos, e uma curva de tensão e deformação adequadas.

Comando cíclico (*Cyclic Command*): Define um comanda cíclico através da união de dois segmentos individuais e repetindo continuamente por um número de ciclos específicos. Quando um ciclo se inicia ele se move primeiramente para o *End Level 1*, e em seguida, termina no *End Level 2* (Figura Apêndice 1.2), determinando assim a amplitude do carregamento.

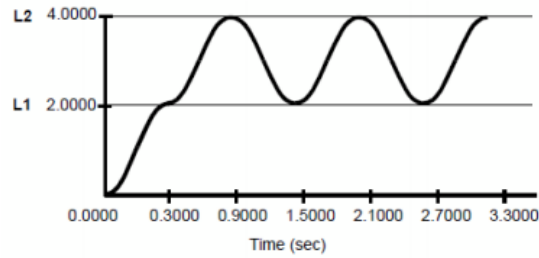
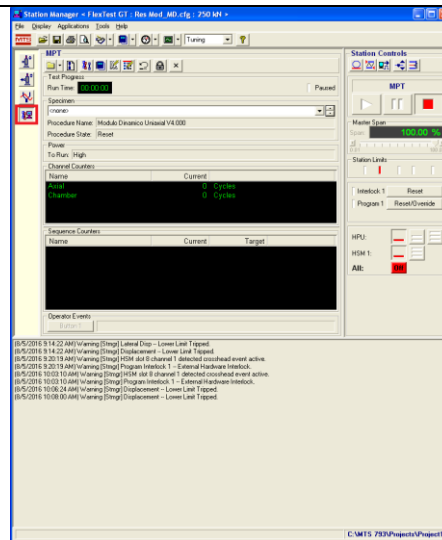


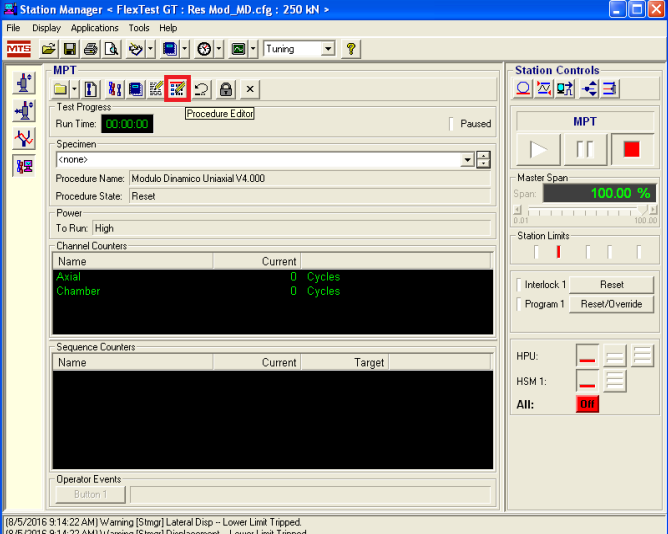
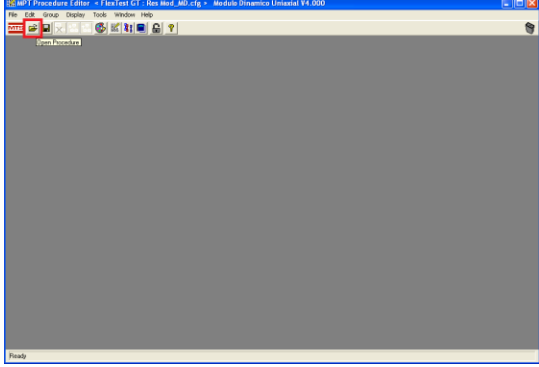
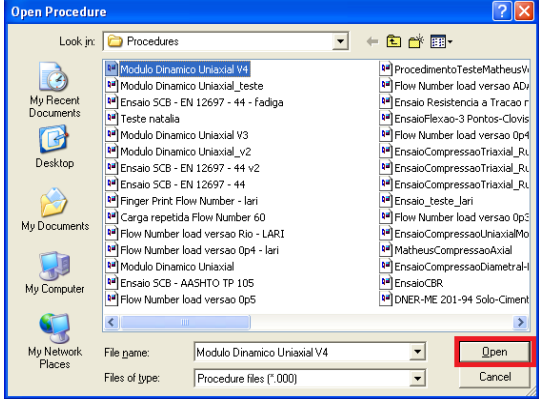
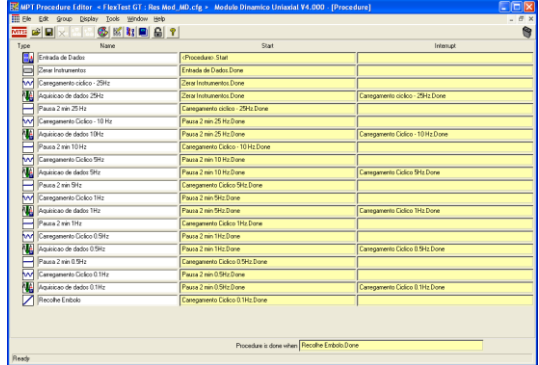
Figura Apêndice 1.2: Forma do carregamento

Comando de pausa (*Dwell Command*): É um único segmento projetado para manter o seu comando em um nível estático por um determinado período de tempo. Quando você definir um comando de pausa é necessário especificar a duração do comando como um tempo ou uma frequência. Após um carregamento cíclico o estado estacionário será no *End Level 1*.

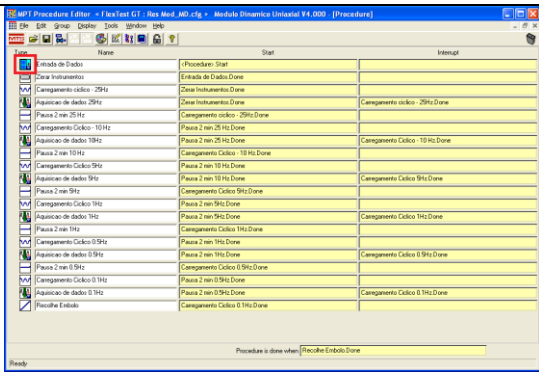
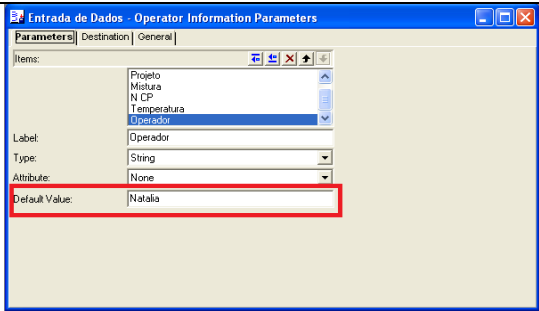
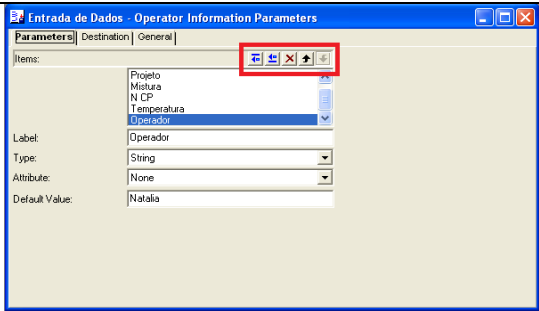
Para acessar o editor do MPT é necessário seguir os seguintes passos:

Acessar o MPT no menu lateral



<p>Clicar em <i>Procedure Editor</i></p>	
<p>Clicar em <i>Open procedure</i></p>	
<p>Selecionar o arquivo Módulo Dinâmico Uniaxial V4. Clicar em <i>Open</i></p>	
<p>A rotina no MPT irá aparecer na tela.</p>	

Conforme a última imagem é possível observar a rotina no MPT. Ela inicia com as Informações do Operador, onde são requisitadas que se preencham os dados de projeto, mistura, número do CP, temperatura e operador. Caso sejam realizados vários ensaios com o mesmo projeto ou mistura é possível estabelecer um texto padrão. Também é possível adicionar ou excluir itens.

<p>Acessar <i>Procedure Editor</i>. Dar um clique duplo em entrada de dados</p>	
<p>Em <i>Parameters</i> editar em <i>Default value</i>, o texto padrão a ser utilizado</p>	
<p>Caso seja necessário adicionar ou excluir um dos itens utilizar os botões em destaque.</p>	

O segundo comando é um evento do operador, para lembrá-lo de zerar os instrumentos de deslocamento e força antes de iniciar a fazer as leituras do ensaio.

O seguinte comando é o carregamento cíclico. Dentro da rotina (Figura Apêndice 1.3) é possível alterar os níveis de carregamento (*End Level 1 e 2*), a forma do carregamento (*Segment Shape*), a frequência (*Frequency*) e o modo de controle (*Control mode*).



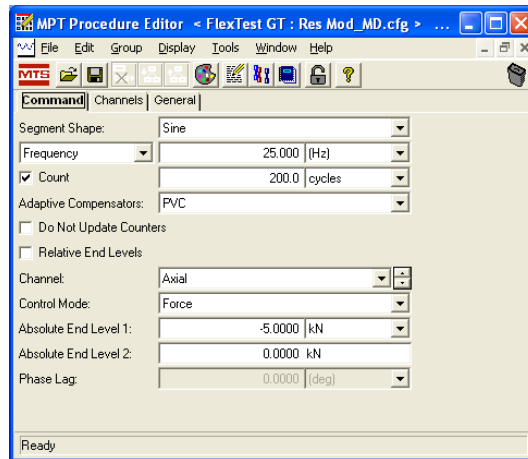


Figura Apêndice 1.3: MTP *produce editor* do carregamento cíclico

A aquisição de dados cíclico é utilizada para adquirir os dados 6 últimos ciclos, sendo apenas necessário 5 ciclos para o cálculo do módulo dinâmico. Conforme Figura Apêndice 1.4 no *Store data at* é possível alterar em quais ciclos a aquisição de dados será efetuada. Na aba *Acquisition* (Figura Apêndice 1.5) é possível alterar a frequência de aquisição de dados no campo *Time Between Points*, sendo que este valor representa o tempo entre cada dado a ser adquirido.

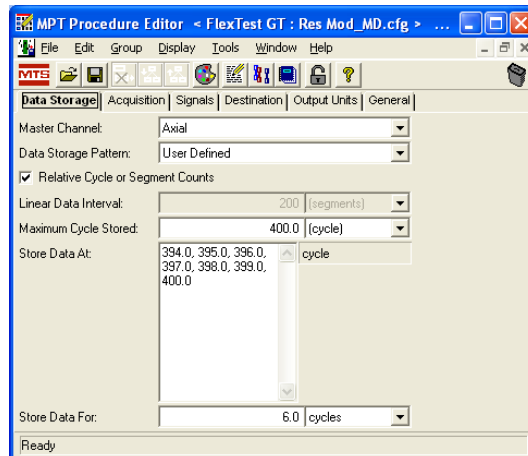


Figura Apêndice 1.4: *Data storage* da aquisição de dados cíclica

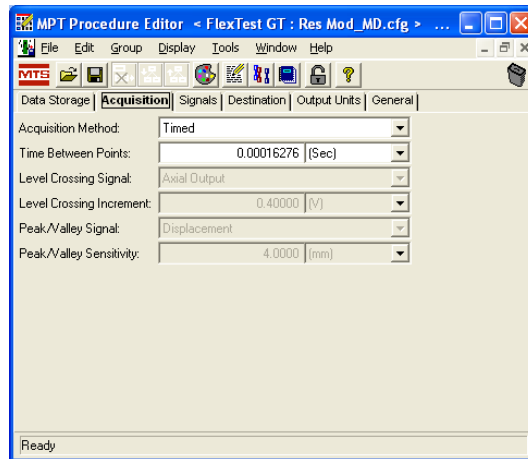


Figura Apêndice 1.5: *Acquisition* da aquisição de dados cíclica

O último comando da rotina, de nome recolhe embolo (Figura Apêndice 1.6), é um carregamento rampa controlado pelo LVDT instalado no atuador. Este comando é utilizado apenas para que o atuador se desaproxime em 10mm da amostra com o fim do ensaio.

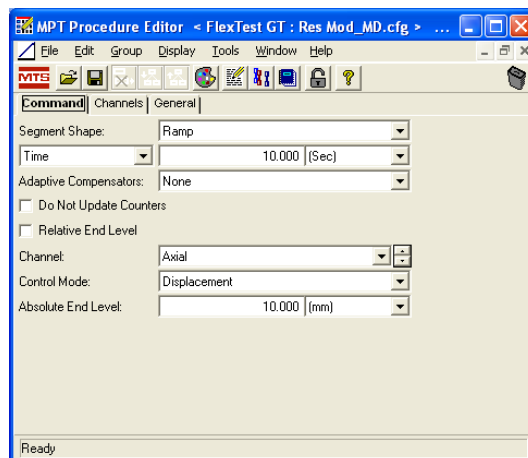


Figura Apêndice 1.6: Comando recolhe êmbolo

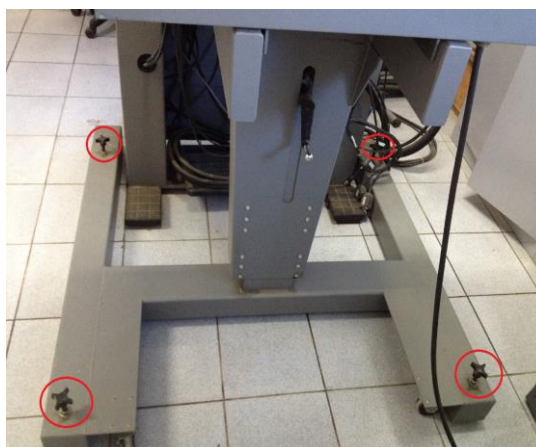
### 3. VERIFICAÇÃO MECÂNICA

Consiste em verificar se todos os elementos estão bem presos ao equipamento para evitar vibrações, bem como, se a câmara de condicionamento está bem instalada.

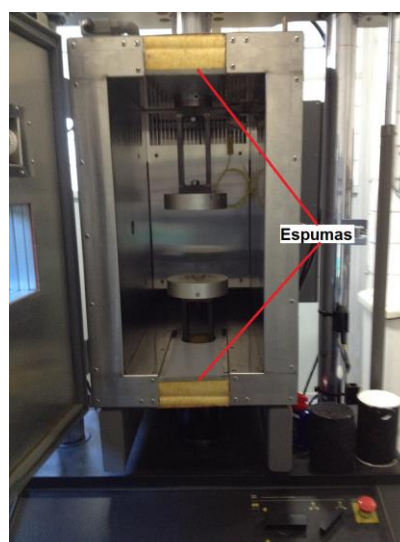
Posicionar a câmara de temperatura

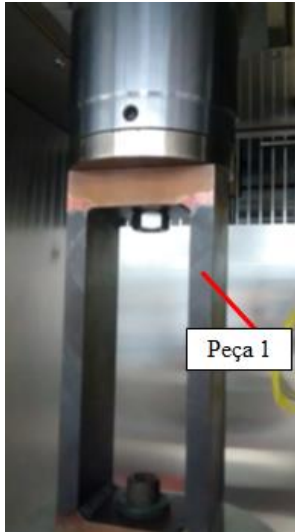
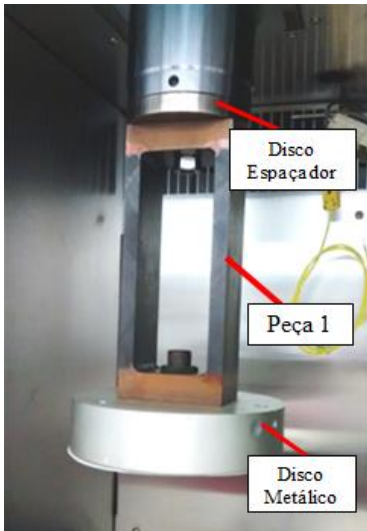


Travar os pés da câmara utilizando os parafusos em destaque. Verificar se todos os parafusos estão bem apertados



Colocar as espumas de isolamento térmico na parte superior e inferior



<p>Encaixar a peça 1 na parte superior da prensa MTS. O encaixe da peça 1 é feito com uma rosca passando no centro da peça. Sobre a peça deve ser colocado um disco espaçador.</p>	
<p>E sob a peça 1 é encaixado um disco metálico, que é encaixado através de uma rosca passando através do centro das peças. O procedimento deve ser repetido para a parte inferior da MTS</p>	

#### 4. CONDICIONAMENTO DO CP

Para caracterização completa da mistura asfáltica é necessário realizar o ensaio em diferentes temperaturas. Seguindo recomendações de Dougan (2003) foi instalada uma amostra com um termômetro espeto para o monitoramento da temperatura da amostra. As amostras foram condicionadas até chegar na temperatura desejada, sendo que a variação máxima da temperatura era de  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$  conforme recomendações da AASHTO T 342/10.

Instalar dentro da câmara o corpo de prova para monitoramento da temperatura e a amostra ser ensaiada.

Ligar os sensores na tomada.



Ligar a câmara de temperatura, acionando os dois botões indicados.



Após o acionamento as luzes devem estar ligadas



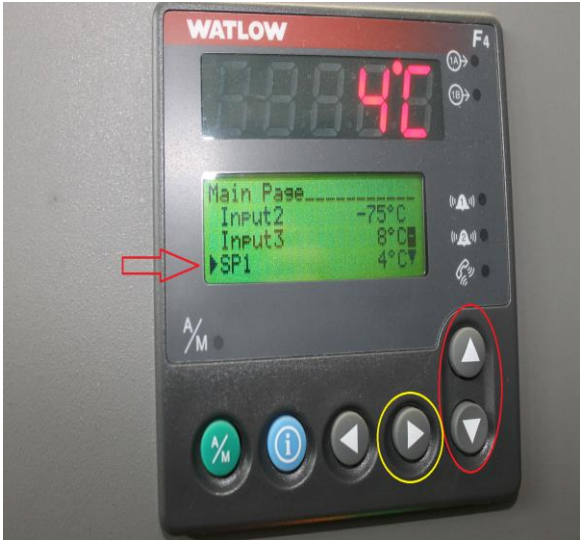

<p>Selecionar SP1 utilizando os botões em destaque vermelho. Posteriormente apertar o botão em destaque amarelo.</p>	
<p>Ajustar para a temperatura do ensaio utilizando os botões com destaque vermelho. Após apertar o botão em destaque amarelo.</p> <p>A Tabela Apêndice 1.1 apresenta a calibração realizada em dezembro de 2016.</p>	

Tabela Apêndice 1.1: Calibração da estufa em dezembro 2016

Temperatura controlador (°C)	Temperatura da amostra (°C)
-13	-10
1	4
20	21
37	37
54	54

Deixar o CP condicionando até atingir a temperatura deseja, controlando sempre pela temperatura interna na amostra.

OBS: a temperatura alvo e a temperatura da amostra podem variar até  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ .



## 5. INICIALIZANDO O EQUIPAMENTO

Nesta etapa é imprescindível que o procedimento seja realizado na ordem correta. Atentar para selecionar o *Res Mod* correto, bem como a célula de carga a qual vai ser utilizada.

Desligar os 4 botões de segurança que estão em destaque. Os mesmo devem estar para frente para estarem desligados.





Ligar o computador



Ligar a *Flex Text GT* Controler



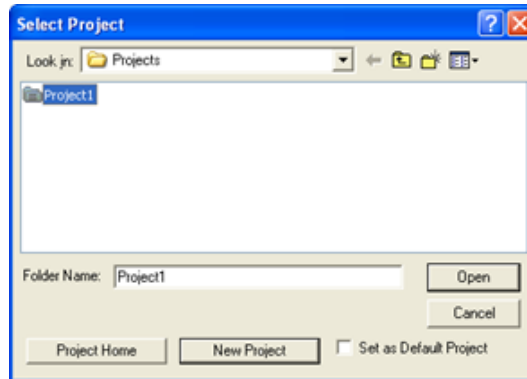
Acionar a bomba e o ventilador





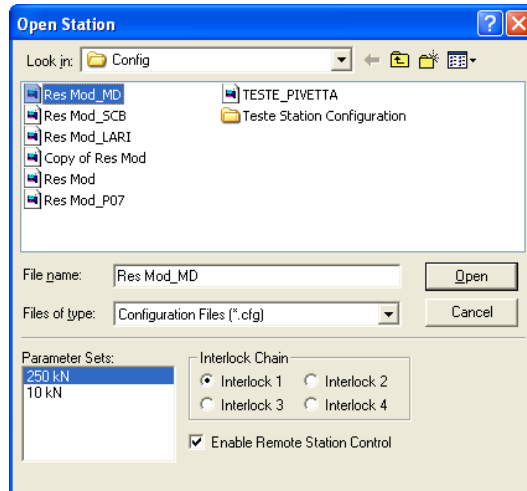
<p>Acionar HPU</p>	
<p>Abrir <i>Stations Manager</i> no computador.</p>	
<p>Reset HPU</p>	

Clicar em *Project 1*

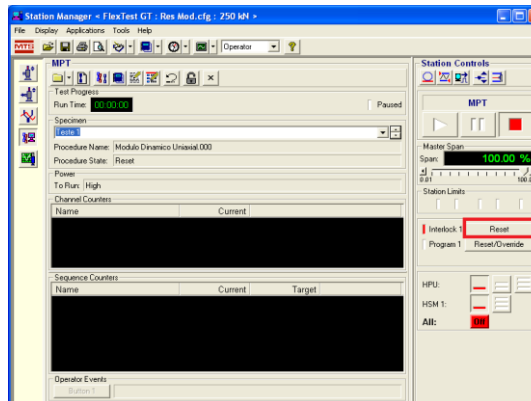


Para verificar se as configurações da célula de carga selecionada conferem com a célula de carga instalada clicar em “Res Mod\_MD”.

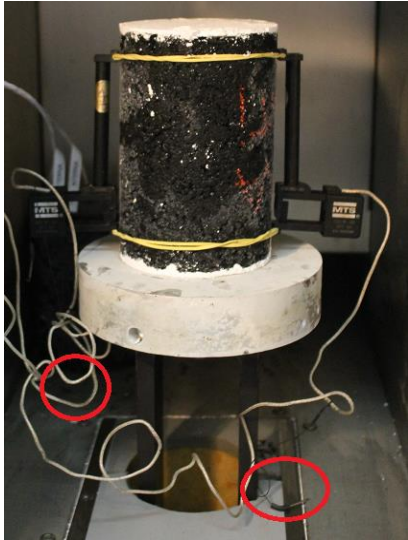

A célula de carga a ser utilizado é a de 250kN.



No *Station Manager*, clicar no botão “Reset” do *Interlock 1* para limpar os avisos de *Interlock*



## 6. MONTAGEM DO CP

<p>Instalar os extensômetros utilizando elásticos, de forma que estejam com 180° um do outro.</p> <p>Destravar o <i>interlock</i> mecânico dos sensores</p>	
<p>Fazer conexão dos sensores, com o conector externo a câmera</p>	

## 7. TUNING

O *Tuning* é um ajuste do seu sistema de teste para que o equipamento responda com precisão o sinal de comando. Quando se realiza o ajuste está sendo definido a resposta e estabilidade da malha de controle

PID, é uma técnica de controle de processos que une as ações derivativa, integral e proporcional, fazendo assim com que o sinal de erro seja minimizado pela ação proporcional, zerado pela ação integral e obtido com uma velocidade antecipativa pela ação derivativa. É baseado na resposta da modelagem matemática de uma malha de processo a ser controlada. Esse

procedimento é necessário para que a curva senoidal tenha uma forma adequada, e assim a resposta de deformação seja correta.

O ganho proporcional é o controle primário e mais grosseiro do sistema. No seu sentido mais genérico, o ganho proporcional termo significa que a mudança na potência de saída é proporcional ao erro. É preciso observar que:

- À medida que aumenta o ganho proporcional, o erro diminui e o sinal de feedback acompanha o sinal de comando mais de perto.
- Ajustes de ganho mais altos aumentam a velocidade da resposta do sistema.
- O excesso de ganho proporcional pode fazer com que o sistema fique instável, enquanto muito pouco ganho proporcional pode fazer com que o sistema fique lento.
- As definições de ganho para os diferentes modos de controle podem variar muito. Por exemplo, o ganho de força pode ser tão baixa quanto 1 enquanto que o valor para a estirpe pode ser tão elevada como 10.000.

Já o ganho integral aumenta a resposta do sistema durante a operação estática ou de baixa frequência e mantém o nível médio no momento da operação de alta frequência. Durante o ajuste do ganho integral deve-se observar que:

- Ganhos integrais superiores aumentam a resposta do sistema
- O excesso de ganho integral pode causar uma oscilação lenta

O ganho derivativo indica a alteração na aceleração do sinal de erro. É um ajuste que não se faz necessário para realização desse ensaio.

O controle da força utiliza um sensor de força (também chamada uma célula de carga) como a fonte de realimentação de controle. O modo de controle de força normalmente requer que um novo ajuste caso a amostra seja alterada, e sempre que as mudanças são feitas para o embolo. O controle de força pode render resposta lenta se o ganho P for definido muito baixo, ou pode render resposta instável se o ganho P está muito alto.

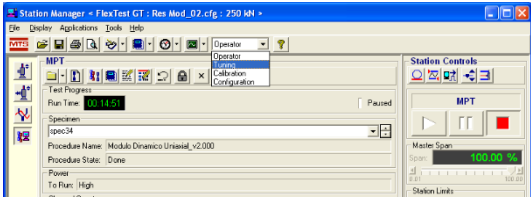
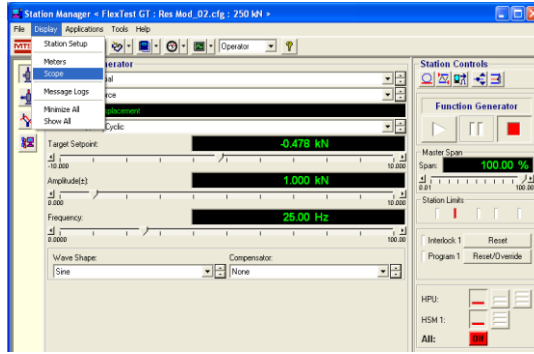
<p>Trocar o nível de acesso de operador para <i>tuning</i>.</p> <p>A senha do <i>tuning</i> é <i>Tuning</i></p>	
<p>No menu lateral acesse o comando <i>Function Generator</i></p>	
<p>Selecione o modo de controle <i>Force</i></p>	
<p>Selecione como <i>Wave shape Sine</i>.</p> <p>Utilize como frequência 25Hz.</p> <p>A amplitude e o ponto alvo (<i>target point</i>) devem seguir a Tabela Apêndice 1.2:.</p>	

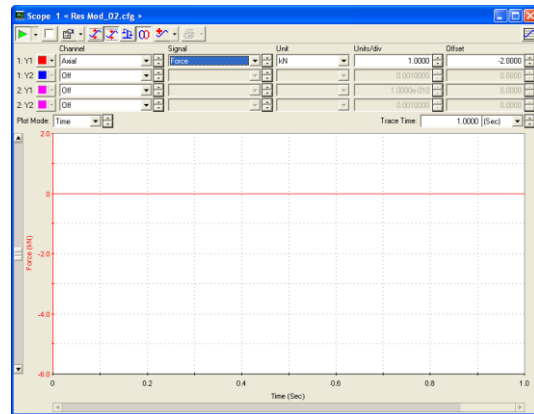
Tabela Apêndice 1.2: Amplitude e ponto alvo para ajuste de PID

Temperatura (°C)	Amplitude (kN)	Ponto alvo (kN)
-10	1,6	-0,8
4	1	-0,5
21	1	-0,5
37	1	-0,5
54	0,5	-0,25

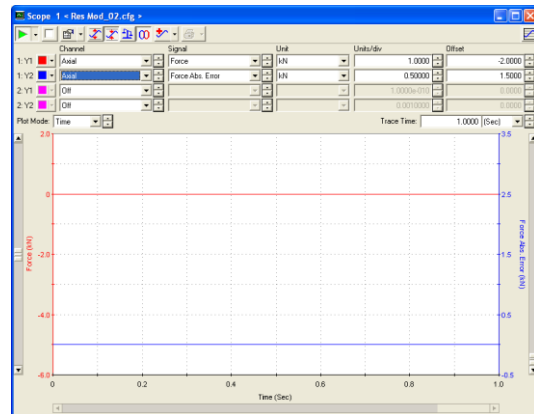
No menu *display* seleccione *Scope*



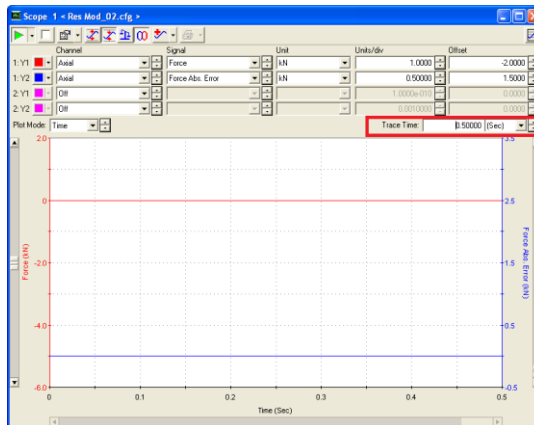
Selecione o *Force* para o canal Y1



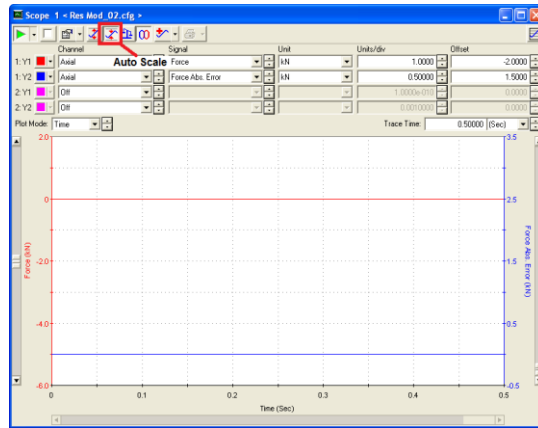
Selecione o *Force Abs. Error* para o canal Y2



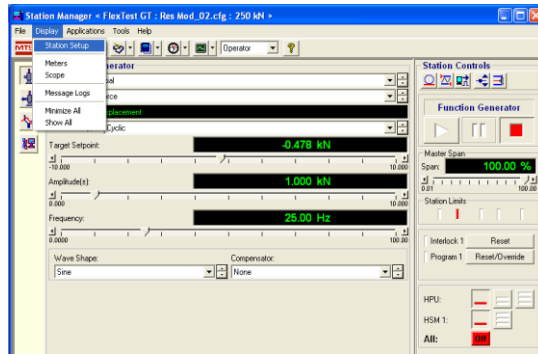
Defina o *Trace time* para 0,5 segundos



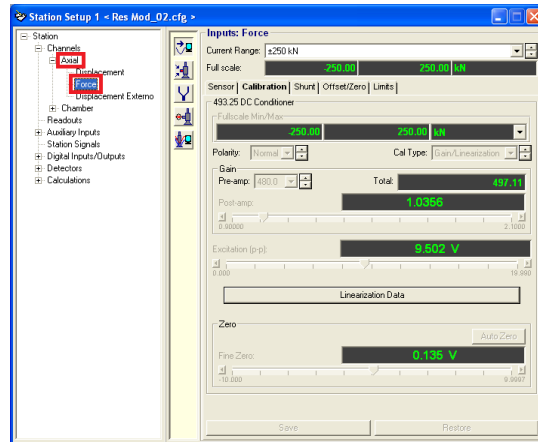
Certifique-se de Auto-Scale está ligado (a posição padrão é ON)



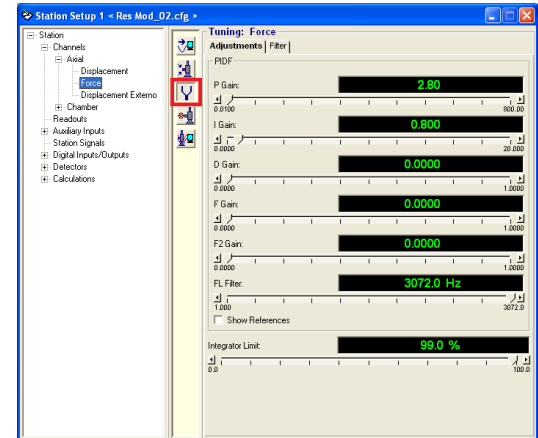
Abrir Station Setup

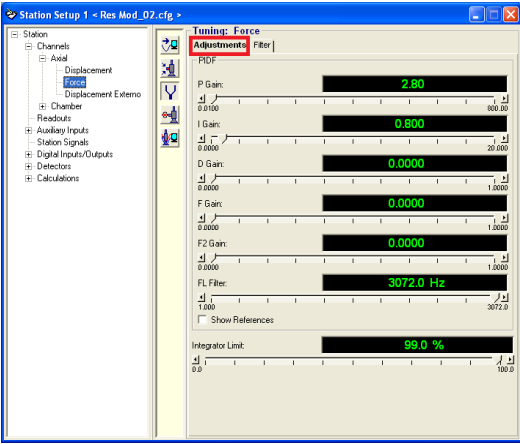
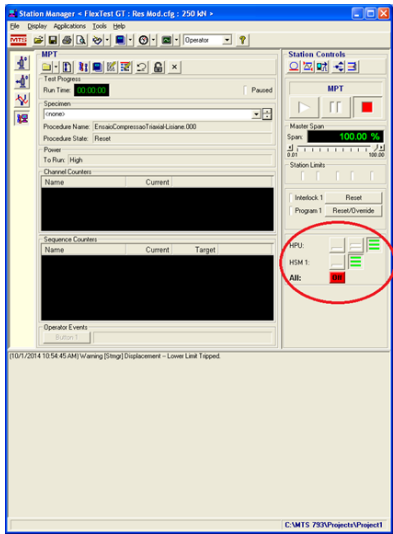
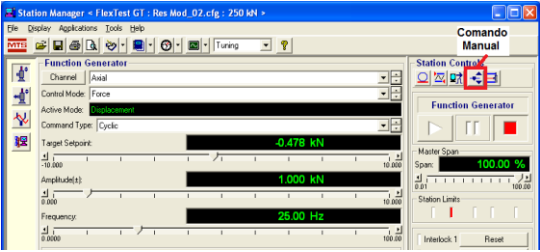
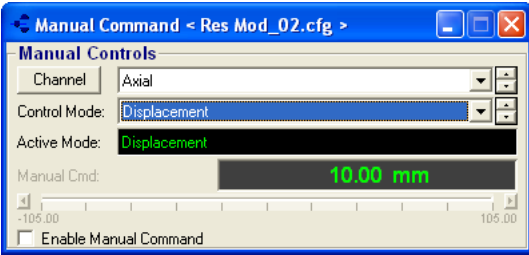


Selecionar o canal Axial > Force

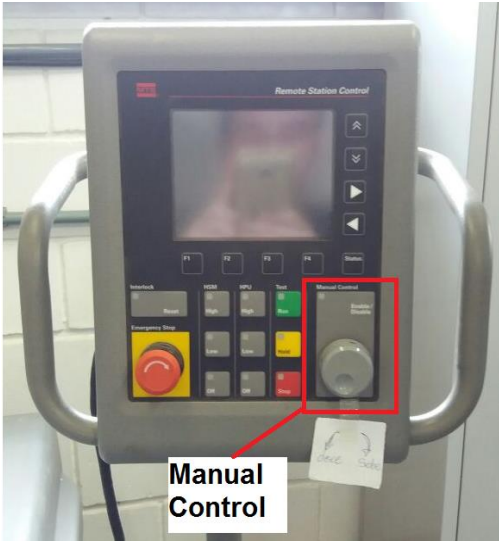

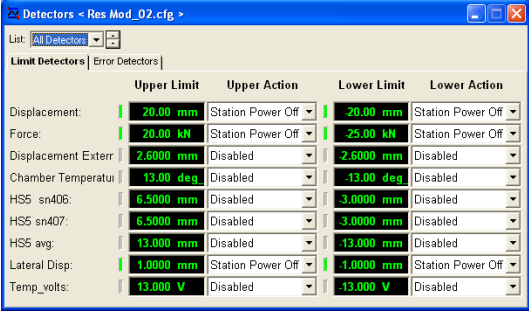


No menu lateral acessar Tuning

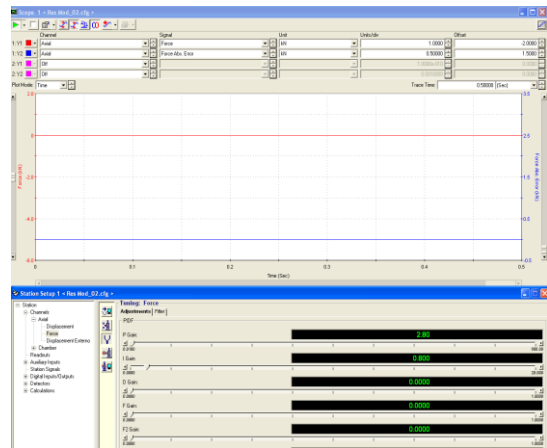


<p>No painel do <i>Tuning</i> selecionar a aba <i>Adjustments</i></p>	
<p>Habilitar HPU e HSM 1</p>	
<p>Abrir controle manual.</p>	
<p>Certifique-se de que o modo de controle de deslocamento é selecionado.</p>	

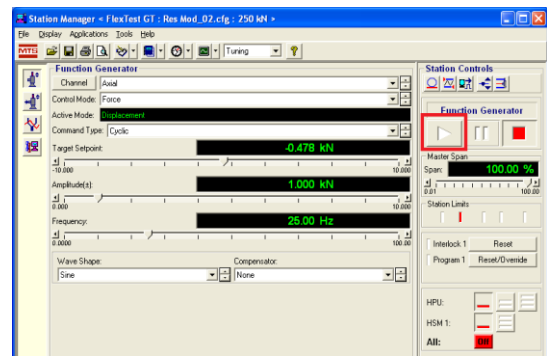


<p>Montar os extensômetros conforme item 4.</p> <p>Instalar a amostra utilizando os comandos para subir e descer o atuador do <i>Remote Station</i></p> <p>OBS: aplicar uma tensão de contato de -0,1kN</p>																																																			
<p>Caso o <i>Offset</i> estiver com valores muito diferentes de zero ajustar o embolo utilizando os comandos em destaque.</p>																																																			
<p>Checar <i>interlocks</i> do sistema conforme figura ao lado</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Upper Limit</th> <th>Upper Action</th> <th>Lower Limit</th> <th>Lower Action</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Displacement:</td> <td>20.00 mm</td> <td>Station Power Off</td> <td>-20.00 mm</td> <td>Station Power Off</td> </tr> <tr> <td>Force:</td> <td>20.00 kN</td> <td>Station Power Off</td> <td>-25.00 kN</td> <td>Station Power Off</td> </tr> <tr> <td>Displacement Exterr</td> <td>2.6000 mm</td> <td>Disabled</td> <td>-2.6000 mm</td> <td>Disabled</td> </tr> <tr> <td>Chamber Temperatur</td> <td>13.00 deg</td> <td>Disabled</td> <td>-13.00 deg</td> <td>Disabled</td> </tr> <tr> <td>HSS sn406:</td> <td>6.5000 mm</td> <td>Disabled</td> <td>-3.0000 mm</td> <td>Disabled</td> </tr> <tr> <td>HSS sn407:</td> <td>6.5000 mm</td> <td>Disabled</td> <td>-3.0000 mm</td> <td>Disabled</td> </tr> <tr> <td>HSS avg:</td> <td>13.000 mm</td> <td>Disabled</td> <td>-13.000 mm</td> <td>Disabled</td> </tr> <tr> <td>Lateral Disp:</td> <td>1.0000 mm</td> <td>Station Power Off</td> <td>-1.0000 mm</td> <td>Station Power Off</td> </tr> <tr> <td>Temp_volts:</td> <td>13.000 V</td> <td>Disabled</td> <td>-13.000 V</td> <td>Disabled</td> </tr> </tbody> </table>		Upper Limit	Upper Action	Lower Limit	Lower Action	Displacement:	20.00 mm	Station Power Off	-20.00 mm	Station Power Off	Force:	20.00 kN	Station Power Off	-25.00 kN	Station Power Off	Displacement Exterr	2.6000 mm	Disabled	-2.6000 mm	Disabled	Chamber Temperatur	13.00 deg	Disabled	-13.00 deg	Disabled	HSS sn406:	6.5000 mm	Disabled	-3.0000 mm	Disabled	HSS sn407:	6.5000 mm	Disabled	-3.0000 mm	Disabled	HSS avg:	13.000 mm	Disabled	-13.000 mm	Disabled	Lateral Disp:	1.0000 mm	Station Power Off	-1.0000 mm	Station Power Off	Temp_volts:	13.000 V	Disabled	-13.000 V	Disabled
	Upper Limit	Upper Action	Lower Limit	Lower Action																																															
Displacement:	20.00 mm	Station Power Off	-20.00 mm	Station Power Off																																															
Force:	20.00 kN	Station Power Off	-25.00 kN	Station Power Off																																															
Displacement Exterr	2.6000 mm	Disabled	-2.6000 mm	Disabled																																															
Chamber Temperatur	13.00 deg	Disabled	-13.00 deg	Disabled																																															
HSS sn406:	6.5000 mm	Disabled	-3.0000 mm	Disabled																																															
HSS sn407:	6.5000 mm	Disabled	-3.0000 mm	Disabled																																															
HSS avg:	13.000 mm	Disabled	-13.000 mm	Disabled																																															
Lateral Disp:	1.0000 mm	Station Power Off	-1.0000 mm	Station Power Off																																															
Temp_volts:	13.000 V	Disabled	-13.000 V	Disabled																																															

Ajustar telas para se seja possível analisar os valores de PID e o *Scope*



No comando *Station Controls* > *MPT play* abrir as janelas do *Tuning* e *Scope*

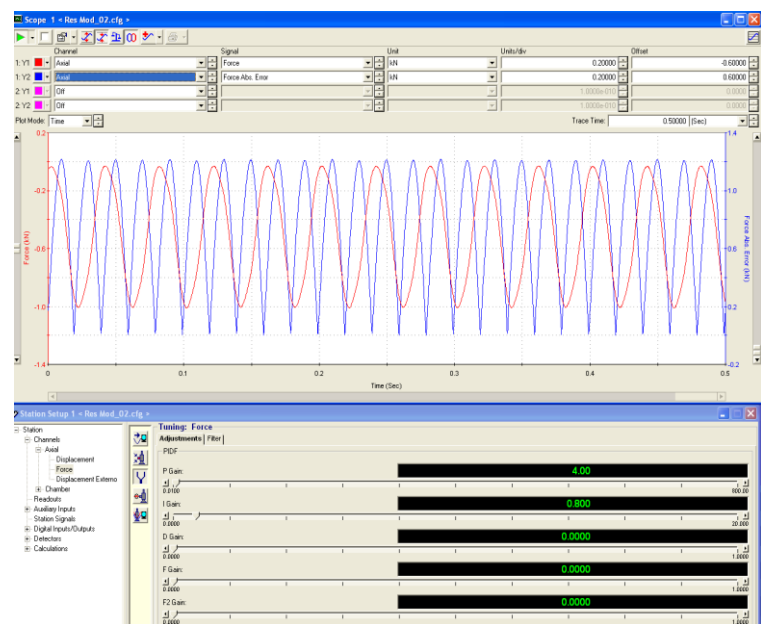


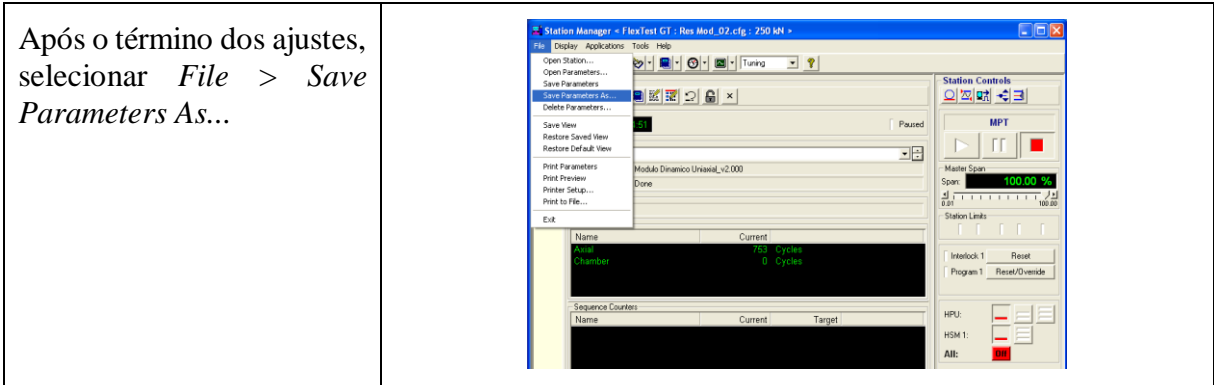
Primeiramente ajuste P. Se necessário ajustar D, e posteriormente o I.

OBS: Em geral é necessário somente o ajuste de P. Manter sempre o I igual a zero, pois o parâmetro é muito sensível e pode distorcer o sinal.

Repita os procedimentos de ajuste até que o *Force Abs. Error* estiver próximo a zero e a forma do carregamento estiver próximo ao solicitado.

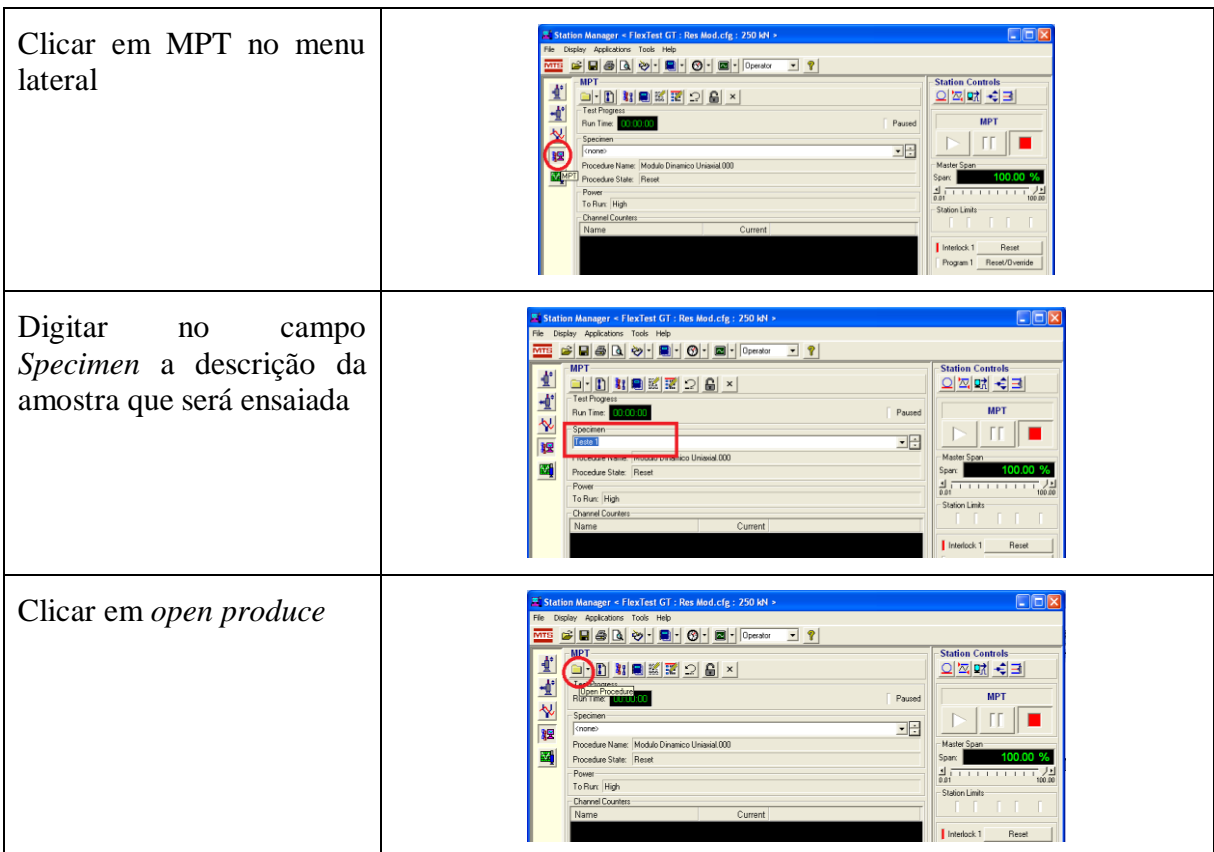
Se necessário utilize a ferramenta de *Auto tuning* para um melhor ajuste dos 3 parâmetros.



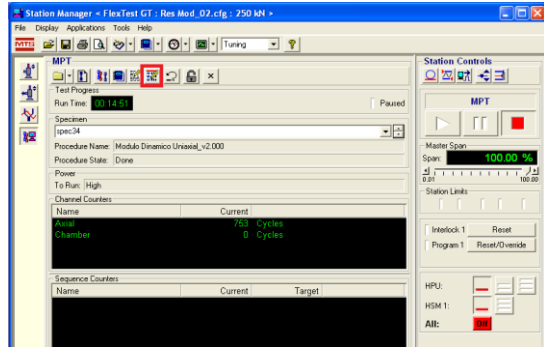


### 8. PROCEDIMENTO TESTE

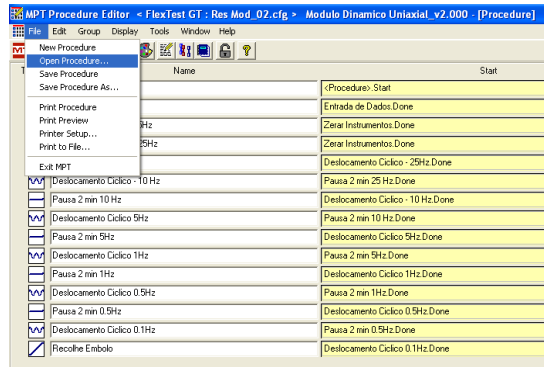
Este procedimento é necessário para seja alcançadas as leituras de deformações de 50 a 75µε nos extensômetros. Para isso a amostra é testada com um número inferior de ciclos nas tensões recomendadas pela AASHTO T 342/10.



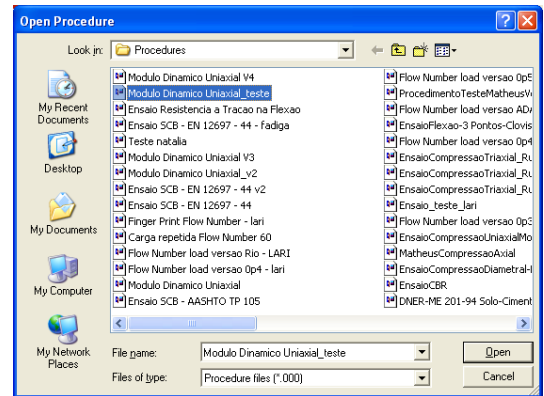
Selecionar MPT Procedure Editor



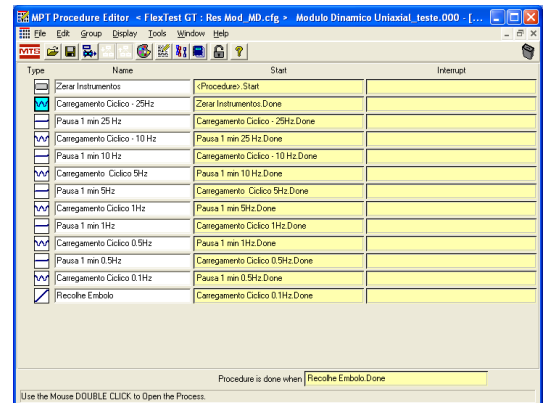
Em File > Open Procedure



Selecionar o arquivo Módulo Dinâmico Uniaxial\_teste



Dar um click duplo sobre o ícone do Carregamento Cíclico 25 Hz.



No comando de atualizar o *End Level 1* conforme Tabela Apêndice 1.3.:

Repetir para o carregamento cíclico das outras frequências

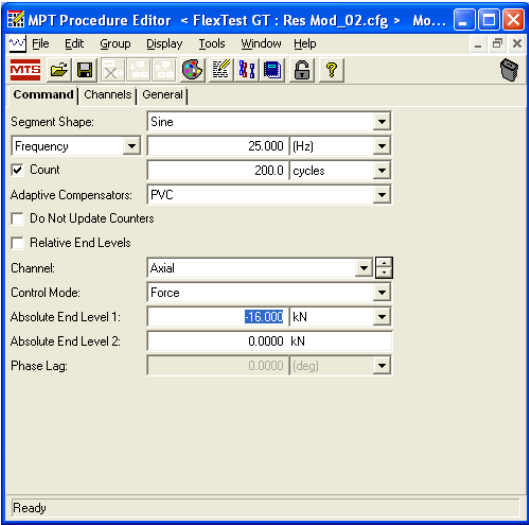
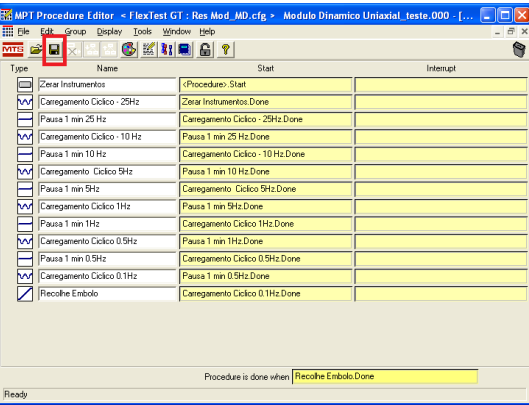


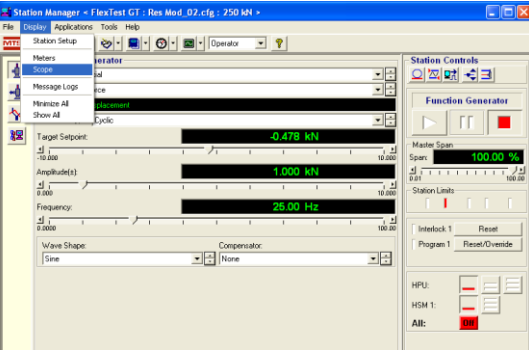
Tabela Apêndice 1.3:Cargas para teste

Temperatura (°C)	Força (kN)
-10	16
4	8
21	4
37	1,5
54	0,4

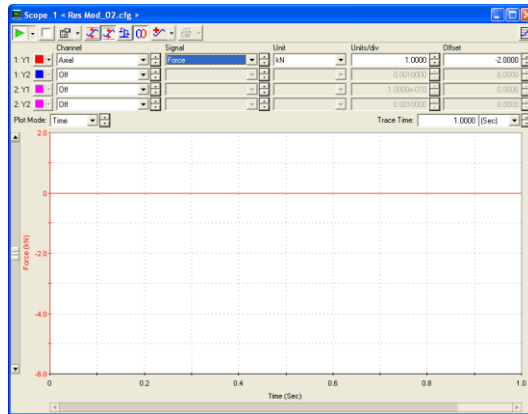
Salvar alterações



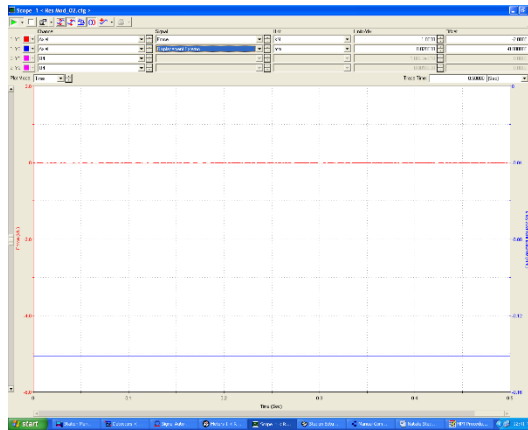
No menu display selecionar *Scope*



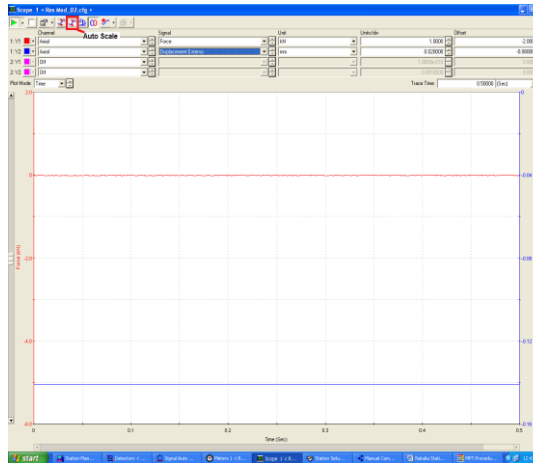
Selecionar *Force* no Y1

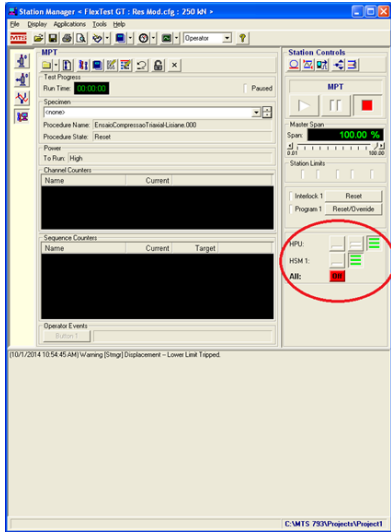
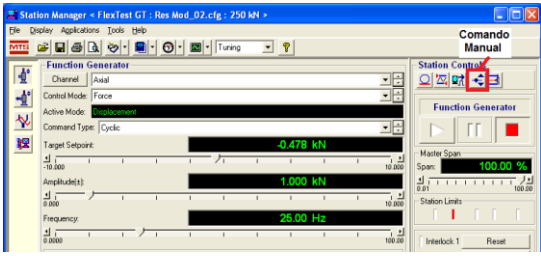
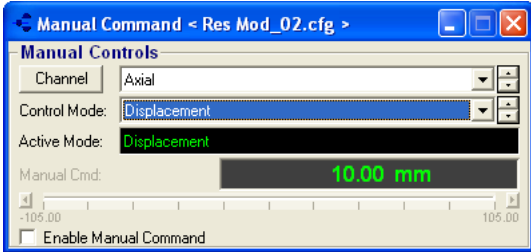
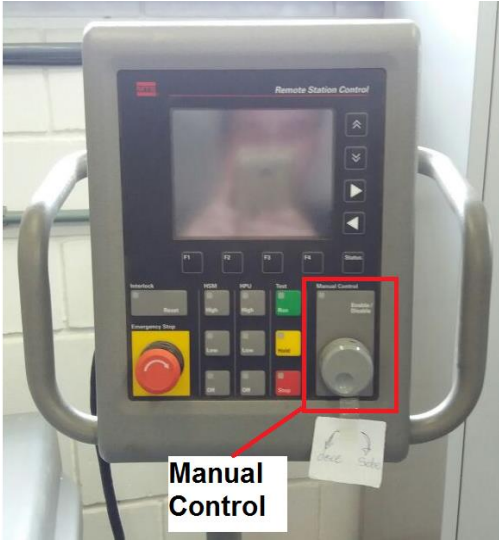



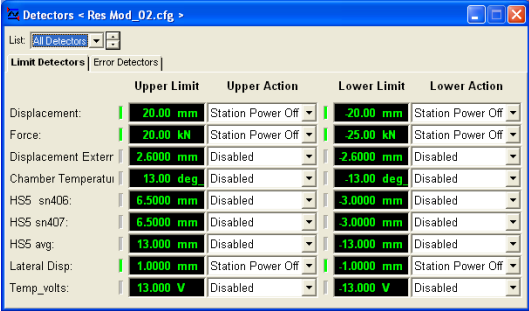
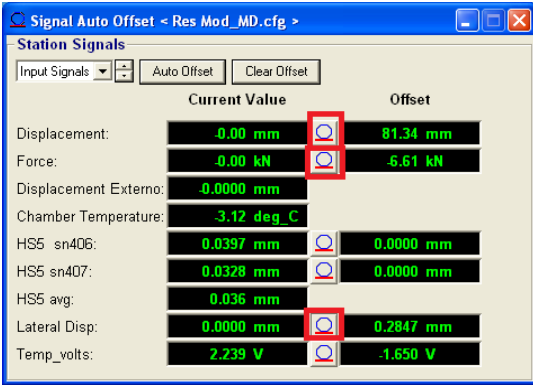
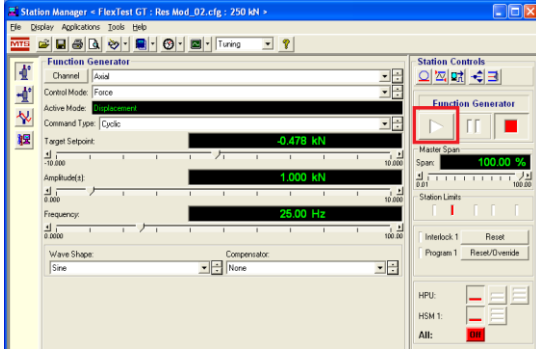
Selecionar *Displacement* Externo no Y2



Certifique-se de *Auto-Scale* está ligado (a posição padrão é ON)

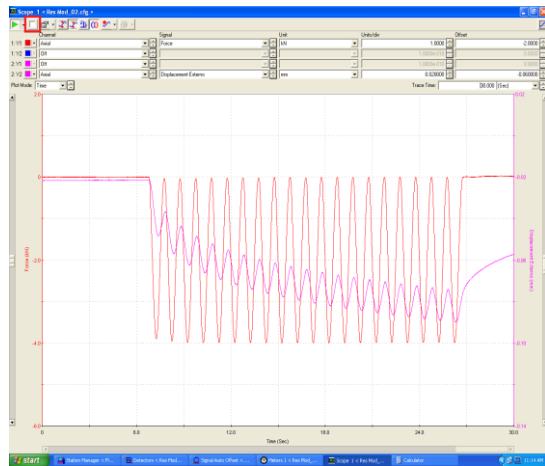


<p>Habilitar HPU e HSM 1</p>	 <p>The screenshot shows the 'Station Manager' software interface. On the right side, under 'Station Controls', there are checkboxes for 'HPU' and 'HSM 1'. Both are currently unchecked. A red circle highlights these two checkboxes. The 'HSM 1' checkbox has a red 'X' next to it, indicating it is disabled or in error.</p>
<p>Abrir controle manual.</p>	 <p>The screenshot shows the 'Station Manager' software with the 'Comando Manual' (Manual Command) window open. The window displays various parameters for the 'Function Generator', including 'Control Mode' (Force), 'Active Mode' (Displacement), 'Command Type' (Cycle), 'Target Setpoint' (-0.478 kN), 'Amplitude(s)' (1.000 kN), and 'Frequency' (25.00 Hz).</p>
<p>Certifique-se de que o modo de controle de deslocamento é selecionado.</p>	 <p>The screenshot shows the 'Manual Command' window. The 'Channel' is set to 'Axial'. The 'Control Mode' is 'Displacement'. The 'Active Mode' is also 'Displacement'. The 'Manual Cmd' is set to '10.00 mm'. There is an 'Enable Manual Command' checkbox at the bottom, which is currently unchecked.</p>
<p>Instalar a amostra utilizando os comandos para subir e descer o atuador do <i>Remote Station</i>. Aplicar carga de contato de igual a 5% da carga máxima.</p>	 <p>The photograph shows the physical 'Remote Station Control' panel. It features a central screen and several buttons. A red box highlights a button labeled 'Manual Control'. Below the panel, there is a white label with the text 'Manual Control' and a red arrow pointing to the highlighted button.</p>

<p>Caso o Offset estiver com valores muito distantes de zero ajustar o embolo utilizando os comandos em destaque.</p>																																																			
<p>Checar <i>interlocks</i> do sistema conforme figura ao lado</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Upper Limit</th> <th>Upper Action</th> <th>Lower Limit</th> <th>Lower Action</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Displacement:</td> <td>20.00 mm</td> <td>Station Power Off</td> <td>-20.00 mm</td> <td>Station Power Off</td> </tr> <tr> <td>Force:</td> <td>20.00 kN</td> <td>Station Power Off</td> <td>-25.00 kN</td> <td>Station Power Off</td> </tr> <tr> <td>Displacement Exterr:</td> <td>2.6000 mm</td> <td>Disabled</td> <td>-2.6000 mm</td> <td>Disabled</td> </tr> <tr> <td>Chamber Temperatur:</td> <td>13.00 deg</td> <td>Disabled</td> <td>-13.00 deg</td> <td>Disabled</td> </tr> <tr> <td>HSS sn406:</td> <td>6.5000 mm</td> <td>Disabled</td> <td>-3.0000 mm</td> <td>Disabled</td> </tr> <tr> <td>HSS sn407:</td> <td>6.5000 mm</td> <td>Disabled</td> <td>-3.0000 mm</td> <td>Disabled</td> </tr> <tr> <td>HSS avg:</td> <td>13.000 mm</td> <td>Disabled</td> <td>-13.000 mm</td> <td>Disabled</td> </tr> <tr> <td>Lateral Disp:</td> <td>1.0000 mm</td> <td>Station Power Off</td> <td>-1.0000 mm</td> <td>Station Power Off</td> </tr> <tr> <td>Temp_volts:</td> <td>13.000 V</td> <td>Disabled</td> <td>-13.000 V</td> <td>Disabled</td> </tr> </tbody> </table>		Upper Limit	Upper Action	Lower Limit	Lower Action	Displacement:	20.00 mm	Station Power Off	-20.00 mm	Station Power Off	Force:	20.00 kN	Station Power Off	-25.00 kN	Station Power Off	Displacement Exterr:	2.6000 mm	Disabled	-2.6000 mm	Disabled	Chamber Temperatur:	13.00 deg	Disabled	-13.00 deg	Disabled	HSS sn406:	6.5000 mm	Disabled	-3.0000 mm	Disabled	HSS sn407:	6.5000 mm	Disabled	-3.0000 mm	Disabled	HSS avg:	13.000 mm	Disabled	-13.000 mm	Disabled	Lateral Disp:	1.0000 mm	Station Power Off	-1.0000 mm	Station Power Off	Temp_volts:	13.000 V	Disabled	-13.000 V	Disabled
	Upper Limit	Upper Action	Lower Limit	Lower Action																																															
Displacement:	20.00 mm	Station Power Off	-20.00 mm	Station Power Off																																															
Force:	20.00 kN	Station Power Off	-25.00 kN	Station Power Off																																															
Displacement Exterr:	2.6000 mm	Disabled	-2.6000 mm	Disabled																																															
Chamber Temperatur:	13.00 deg	Disabled	-13.00 deg	Disabled																																															
HSS sn406:	6.5000 mm	Disabled	-3.0000 mm	Disabled																																															
HSS sn407:	6.5000 mm	Disabled	-3.0000 mm	Disabled																																															
HSS avg:	13.000 mm	Disabled	-13.000 mm	Disabled																																															
Lateral Disp:	1.0000 mm	Station Power Off	-1.0000 mm	Station Power Off																																															
Temp_volts:	13.000 V	Disabled	-13.000 V	Disabled																																															
<p>Zerar sensores: <i>Force, Displacement e Lateral Disp</i> no <i>Signal Auto Offset</i></p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Current Value</th> <th>Offset</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Displacement:</td> <td>-0.00 mm</td> <td>81.34 mm</td> </tr> <tr> <td>Force:</td> <td>-0.00 kN</td> <td>-6.61 kN</td> </tr> <tr> <td>Displacement Externo:</td> <td>-0.0000 mm</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Chamber Temperature:</td> <td>-3.12 deg_C</td> <td></td> </tr> <tr> <td>HSS sn406:</td> <td>0.0397 mm</td> <td>0.0000 mm</td> </tr> <tr> <td>HSS sn407:</td> <td>0.0328 mm</td> <td>0.0000 mm</td> </tr> <tr> <td>HSS avg:</td> <td>0.036 mm</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Lateral Disp:</td> <td>0.0000 mm</td> <td>0.2847 mm</td> </tr> <tr> <td>Temp_volts:</td> <td>2.239 V</td> <td>-1.650 V</td> </tr> </tbody> </table>		Current Value	Offset	Displacement:	-0.00 mm	81.34 mm	Force:	-0.00 kN	-6.61 kN	Displacement Externo:	-0.0000 mm		Chamber Temperature:	-3.12 deg_C		HSS sn406:	0.0397 mm	0.0000 mm	HSS sn407:	0.0328 mm	0.0000 mm	HSS avg:	0.036 mm		Lateral Disp:	0.0000 mm	0.2847 mm	Temp_volts:	2.239 V	-1.650 V																				
	Current Value	Offset																																																	
Displacement:	-0.00 mm	81.34 mm																																																	
Force:	-0.00 kN	-6.61 kN																																																	
Displacement Externo:	-0.0000 mm																																																		
Chamber Temperature:	-3.12 deg_C																																																		
HSS sn406:	0.0397 mm	0.0000 mm																																																	
HSS sn407:	0.0328 mm	0.0000 mm																																																	
HSS avg:	0.036 mm																																																		
Lateral Disp:	0.0000 mm	0.2847 mm																																																	
Temp_volts:	2.239 V	-1.650 V																																																	
<p>No comando <i>Station Controls&gt;MPT Play</i></p>																																																			



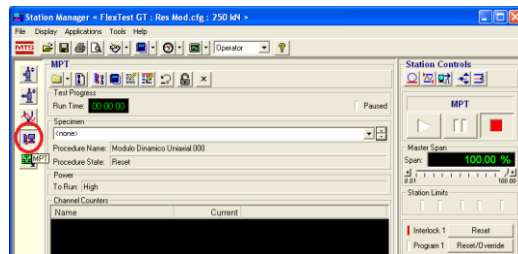
No *Scope* pausar o gráfico durante a aplicação de carga



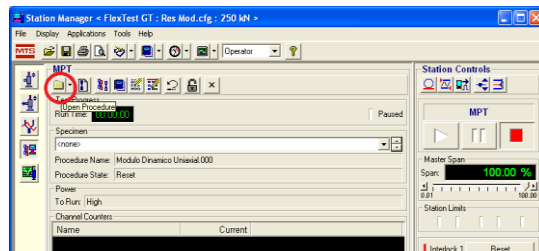
Anotar os valores da deformação de pico (L1) e vale (L2). Calcular a amplitude, sendo: amplitude = L1-L2. A amplitude do deslocamento deve estar entre 0,0058 e 0,0115mm, ou seja, 50 a 100 $\mu\epsilon$ . Caso a amplitude estiver fora desse intervalo aumentar ou diminuir a força no End Level 2.

## 9. ENSAIO

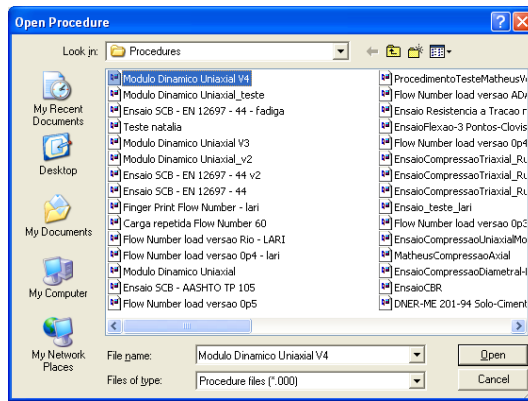
Clicar em MPT no menu lateral



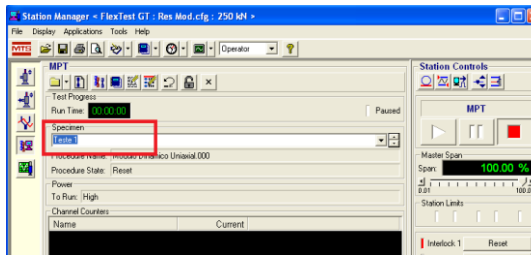
Clicar em *open produce*



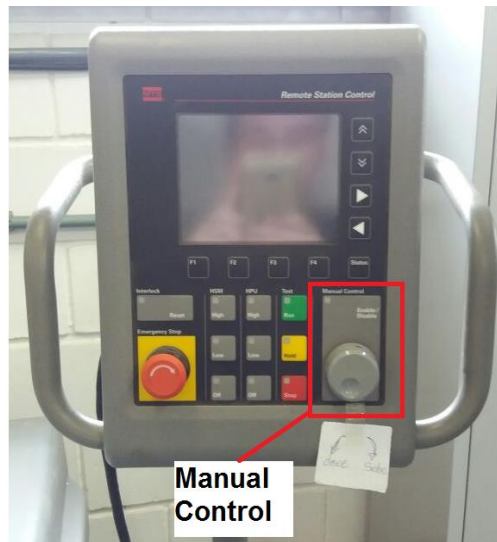
Abrir procedimento Dinâmico Uniaxial V4



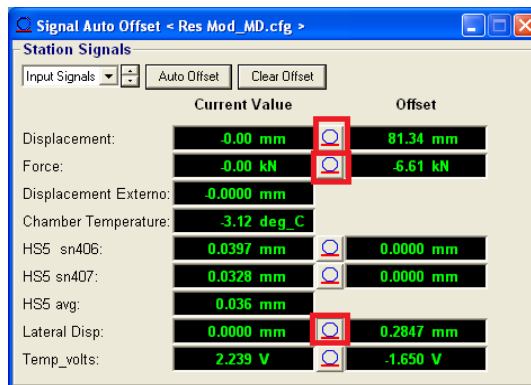
Selecionar a Specimen criada no campo em destaque



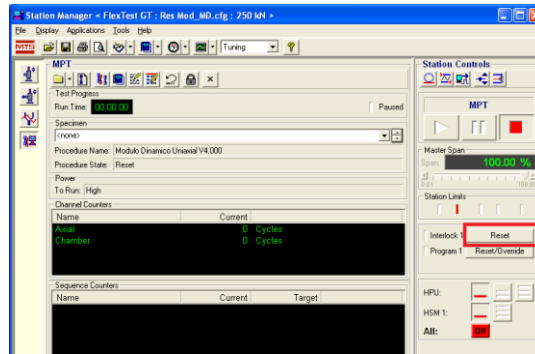
Baixar o êmbolo utilizando o botão *Manual Control* no manual até uma força de contato igual a 5% da carga máxima.



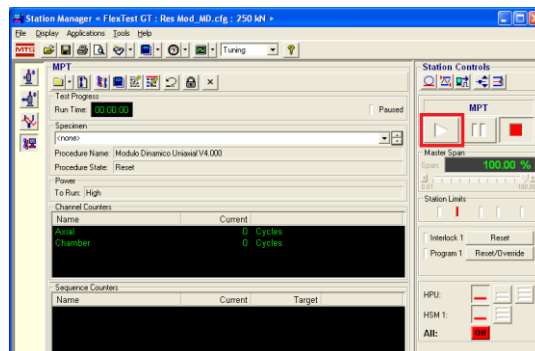
Zerar sensores: *Force*, *Displacement* e *Lateral Disp* no *Signal Auto Offset*



Reset *Interlock e Program*  
1



MPT PLAY



## 10. ENCERRAR ENSAIO

Desligar câmara de temperatura

Colocar travas dos sensores, (*interlocks* de medida da deformação), desconecta-los dos cabos externos e remove-los do CP.

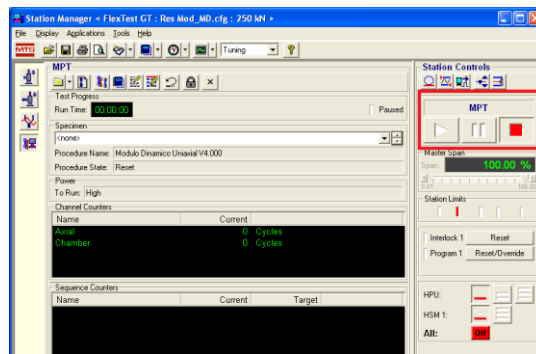
Retirar CP da câmara



Levantar pórtico no *interlock* manual e não se esquecer de fechar a válvula que movimenta o pórtico.



Verificar se está rodando o ensaio. No MPT o *stop* deve estar selecionado.



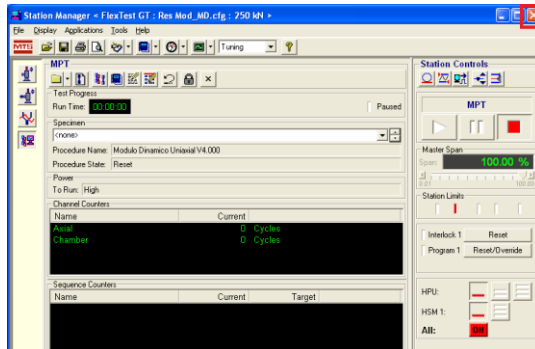
Desativar HPU



Desativar bomba e ventilador



Fechar *Station Manager*



Desligar *Flex Test GT Controller*



Desligar o computador



## APÊNDICE 2

Resultados dos ensaios com ligantes asfálticos

Tabela Apêndice 2.1 : Propriedades do cimento asfáltico CAP 50/70

Ensaio	Método	Especificação ANP CAP 50/70	Resultado				Unidade
			CAP 50/70	CAP 50/70 Após RTFOT	CAP 50/70 com EVOTHERM	CAP 50/70 com EVOTHERM Após RTFOT	
Viscosidade Brookfield a 135°C	NBR 15184	mínimo 274	327,5	705	320	337,5	cP
Viscosidade Brookfield a 150°C	NBR 15184	mínimo 112	165	356	167	167	cP
Viscosidade Brookfield a 177°C	NBR 15184	57 a 285	61,5	129	60,5	60,5	cP
Densidade de materiais betuminosos	NBR6296	-	1,0091	-	1,0063	-	g/cm <sup>3</sup>
Ponto de amolecimento	NBR 6560	mínimo 46	48	50	47	48	°C
Aumento do ponto de amolecimento após RTFOT	NBR 6560	máximo 8		2		1	°C
Penetração, 25°C, 100g	NBR 6576	50 a 70	61	38	58	57	0,1mm
Penetração retida após RTFOT	NBR 6576	mínimo 55		62		98	%
IST		-1,5 a 0,7	-1,3	-1,8	-1,6	-1,5	adm

Tabela Apêndice 2.2 : Propriedades do cimento asfáltico AMP 60/85

Ensaio	Método	Especificação ANP AMP60/85	Resultado				Unidade
			AMP 60/85	AMP 60/85 Após RTFOT	AMP 60/85 com EVOTHERM	AMP 60/85 com EVOTHERM Após RTFOT	
Viscosidade Brookfield a 135°C	NBR 15184	máximo 3000	1220	4225	1168	1630	cP
Viscosidade Brookfield a 150°C	NBR 15184	máximo 2000	603	1634	591	780	cP
Viscosidade Brookfield a 177°C	NBR 15184	máx 1000	222,5	244	291,5	295	cP
Densidade de materiais betuminosos	NBR6296	-	1,0030	-	1,0030	-	g/cm <sup>3</sup>
Ponto de amolecimento	NBR 6560	mínimo 60	67	73	64	71	°C
Aumento do ponto de amolecimento após RTFOT	NBR 6560	-5 a 7		6		7	°C
Penetração, 25°C, 100g	NBR 6576	40 a 70	59	45	55	49	0,1mm
Penetração retida após RTFOT	NBR 6576	mínimo 60		76		88	%
Recuperação elástica, 25°C, 20 cm	NBR 15086	mínimo 85	94	92	93	92	%
Porcentagem de recuperação elástica original a 25°C após RTFOT	NBR 15086	mínimo 80		98		99	%



Tabela Apêndice 2.3 : Propriedades do cimento asfáltico CAP TLA

Ensaio	Método	Especificação ANP CAP TLA	Resultado				Unidade
			CAP TLA	CAP TLA Após RTFOT	CAP TLA com EVOTHERM	CAP TLA com EVOTHERM Após RTFOT	
Viscosidade Brookfield a 135°C	NBR 15184	mínimo 500	747,5	3450	1590	2400	cP
Viscosidade Brookfield a 150°C	NBR 15184	mínimo 200	347	1380	730	1040	cP
Viscosidade Brookfield a 177°C	NBR 15184	mínimo 80	115	653	241	314	cP
Densidade de materiais betuminosos	NBR 6296	-	1,0577	-	1,0800	-	g/cm <sup>3</sup>
Ponto de amolecimento	NBR 6560	mínimo 52	55	60	56	60	°C
Aumento do ponto de amolecimento após RTFOT	NBR 6560	máximo 8		6		5	°C
Penetração, 25°C, 100g	NBR 6576	30 a 45	34	12	26	15	0,1mm
Penetração retida após RTFOT	NBR 6576	mínimo 55		36		57	%

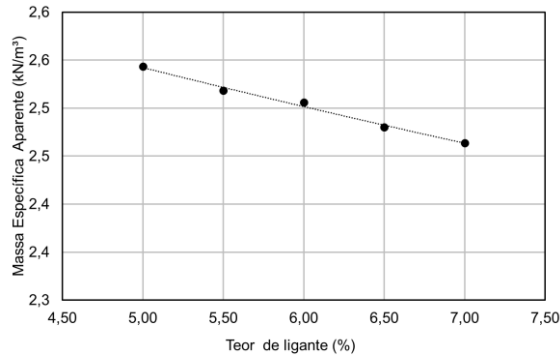
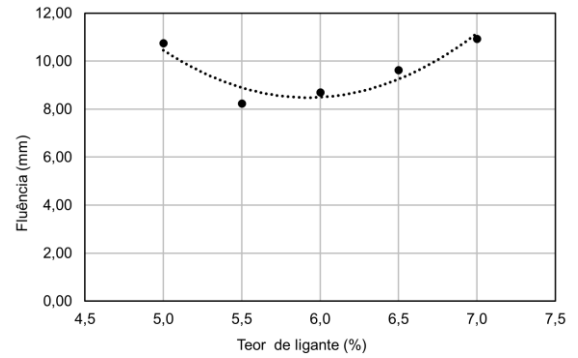
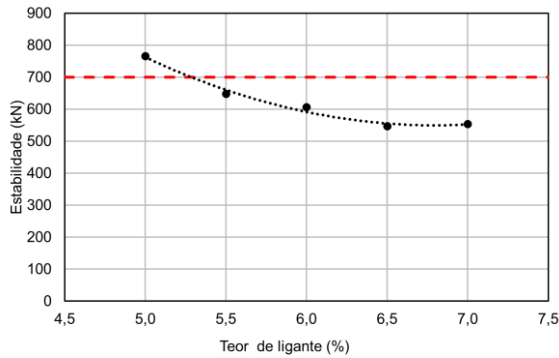
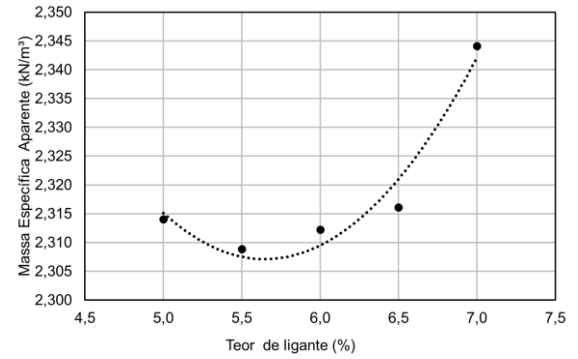
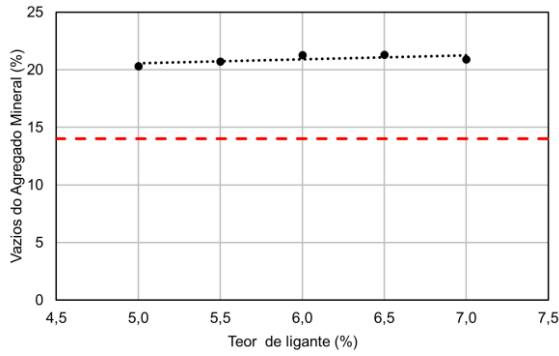
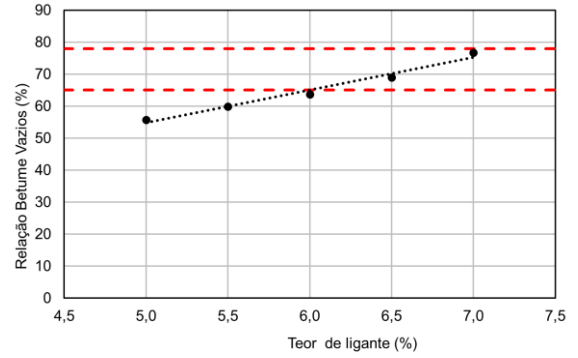
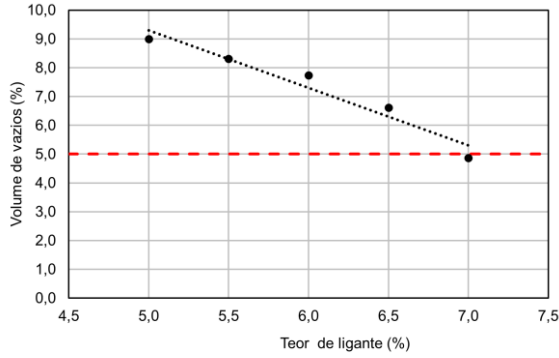
Tabela Apêndice 2.4 : Propriedades do cimento asfáltico AB8

Ensaio	Método	Especificação ANP AB8	Resultado				Unidade
			AB8	AB8 Após RTFOT	AB8 com EVOTHERM	AB8 com EVOTHERM Após RTFOT	
Viscosidade Brookfield a 175°C	NBR 15529	800 a 2000	1575	1630	1215	-	cP
Densidade de materiais betuminosos	NBR6296	-	1,0237	-	1,0227	-	g/cm <sup>3</sup>
Ponto de amolecimento	NBR 6560	mínimo 50	55	60	55	59	°C
Aumento do ponto de amolecimento após RTFOT	NBR 6560	máximo 10		5		4	°C
Penetração, 25°C, 100g	NBR 6576	30a 70	64	51	60	54	0,1mm
Penetração retida após RTFOT	NBR 6576	mínimo 55		80		89	%
Recuperação elástica, 25°C, 10 cm	NBR 15086	mínimo 50	78	86	83	84	%
Porcentagem de recuperação elástica original a 25°C após RTFOT	NBR 15086	mínimo 100		110		101	%

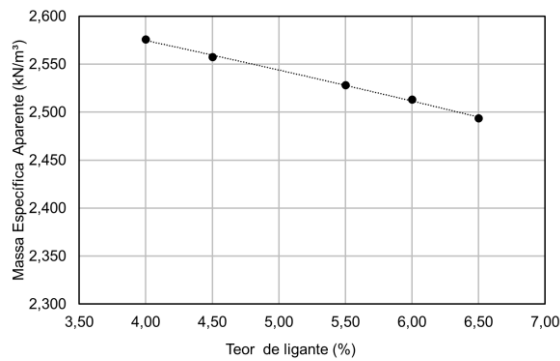
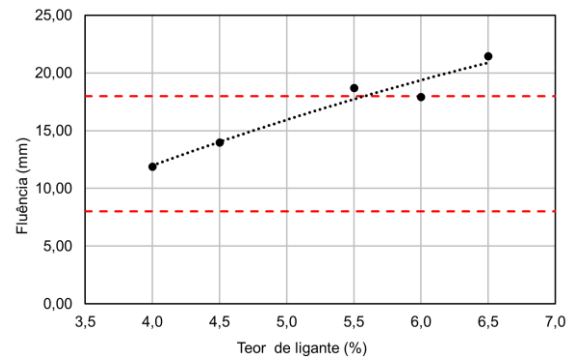
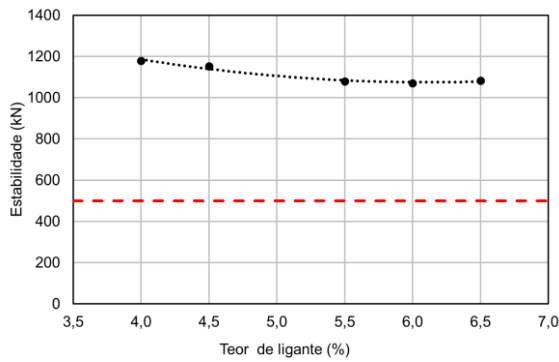
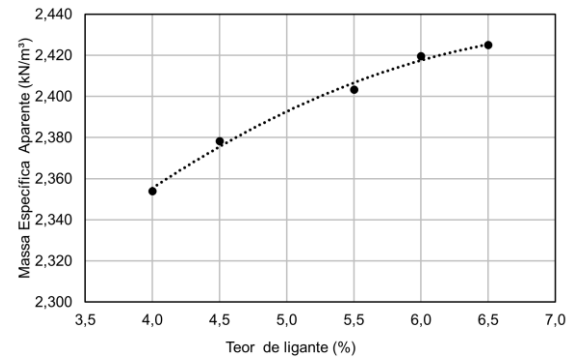
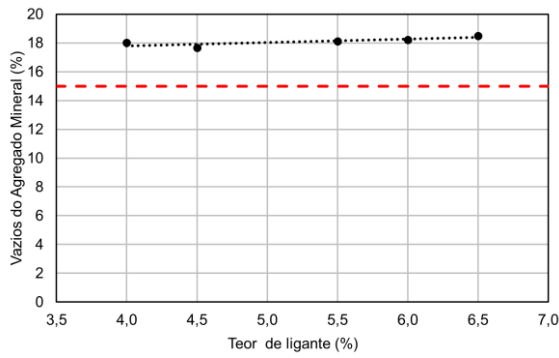
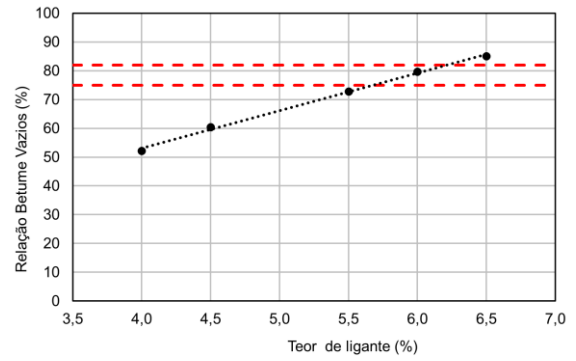
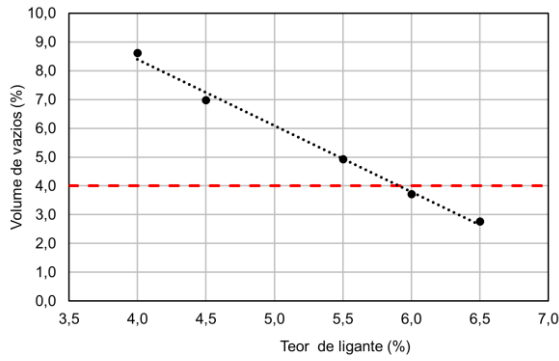
## APÊNDICE 3

Resultados da dosagem Marshall

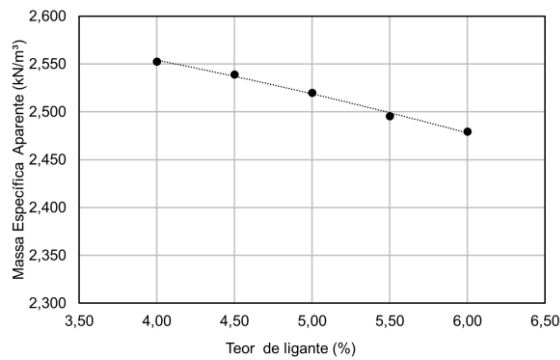
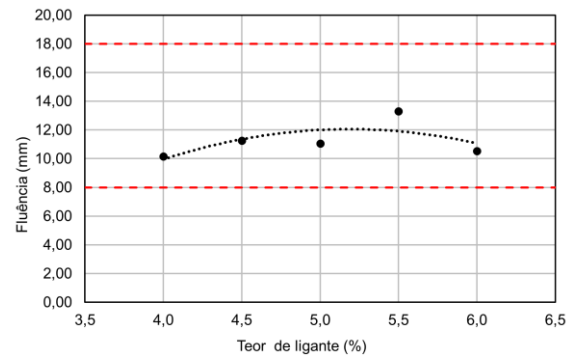
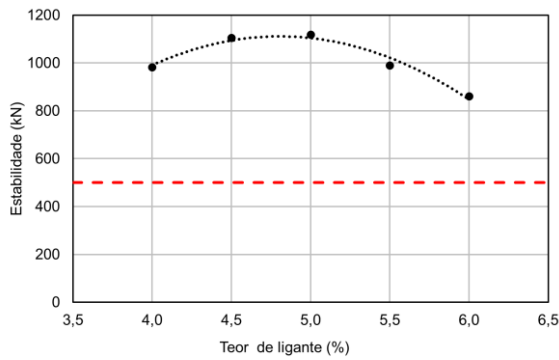
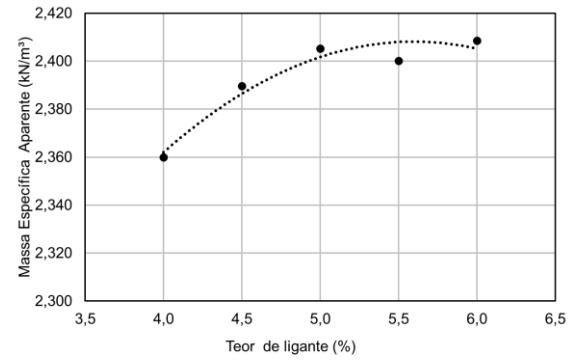
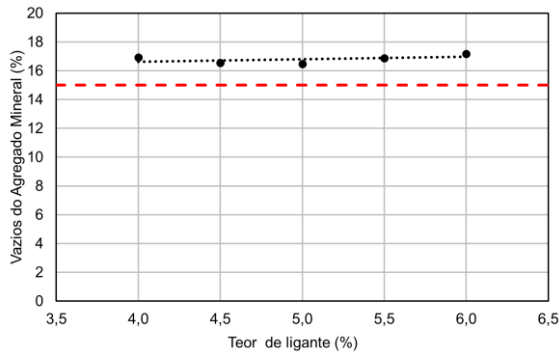
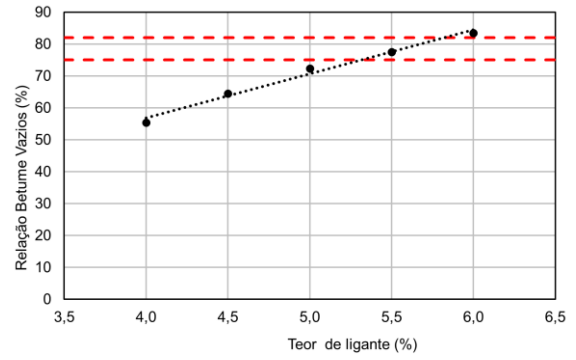
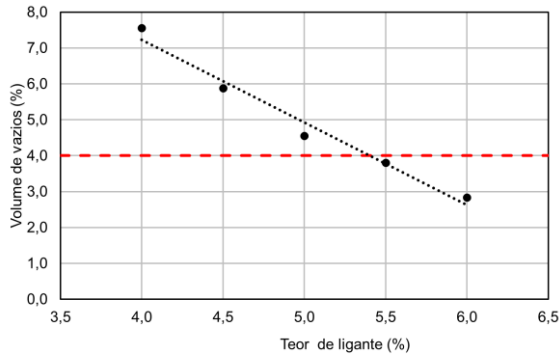
Apêndice 3.1: Resultados da dosagem com AB8



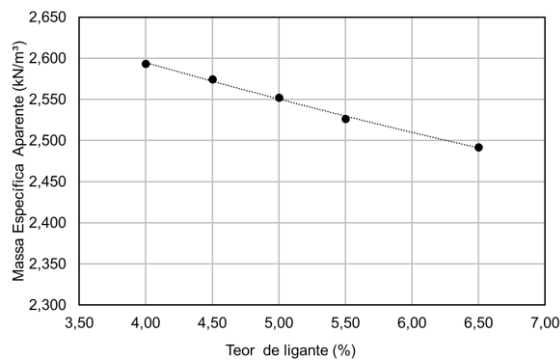
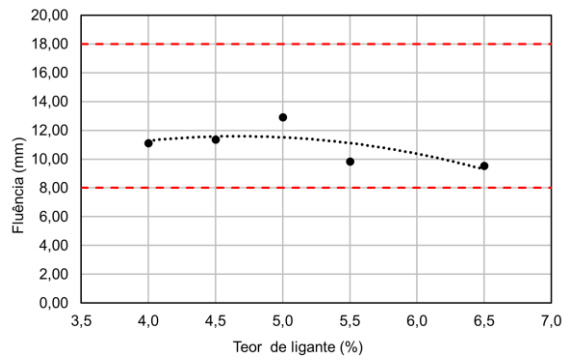
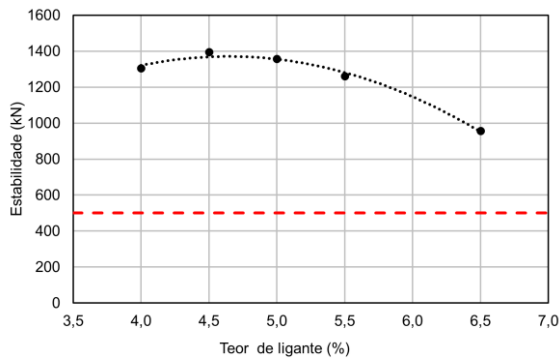
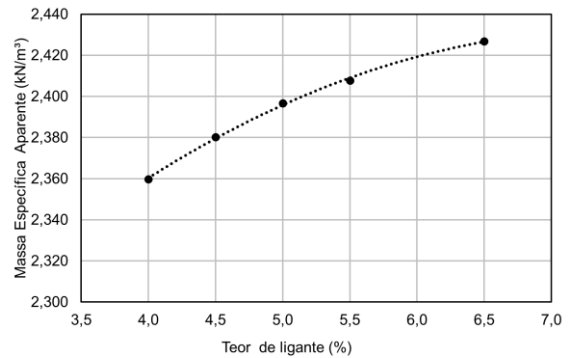
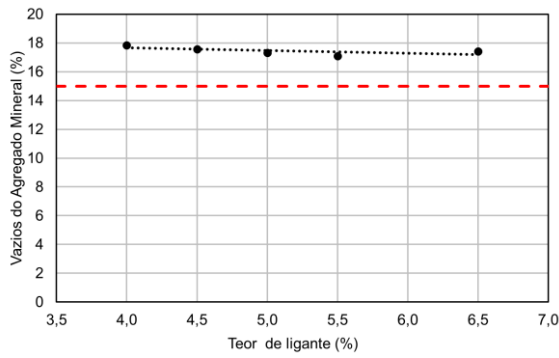
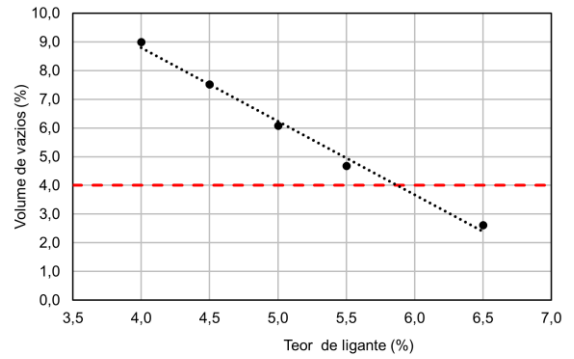
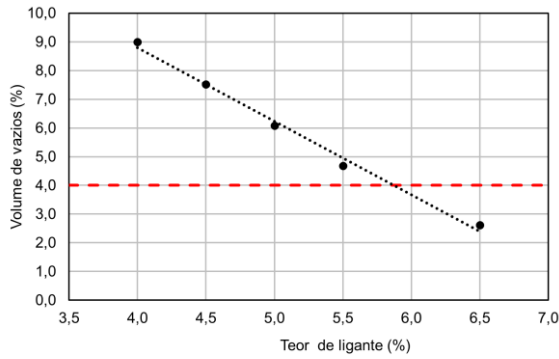
Apêndice 3.2: Resultados da dosagem com AMP 60/85



Apêndice 3.3: Resultados da dosagem com CAP 50/70



Apêndice 3.4: Resultados da dosagem com CAP TLA



## APÊNDICE 4

Resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase



Apêndice 4.1: Resultados módulo dinâmico e ângulo de fase para a mistura AB8

Temp. (°C)	Frequência (Hz)	Quente				Morno			
		$ E^* $ (MPa)	$\varphi$ (°)	Se( $\sigma$ )	Se( $\epsilon$ )	$ E^* $ (MPa)	$\varphi$ (°)	Se( $\sigma$ )	Se( $\epsilon$ )
-10	25	43001	2,4	12,5	9,3	31341	3,3	11,8	10,4
	10	37713	3,9	12,3	7,3	31051	4,1	12,6	8,4
	5	34871	4,3	7,1	4,4	29550	4,3	7,3	5,7
	1	32865	5,6	1,3	1,9	27293	6,1	1,5	2,2
	0,5	31343	6,3	0,7	1,6	26215	6,7	0,8	1,9
	0,1	30141	7,1	0,3	1,5	23337	8,3	0,4	2,2
4	25	27238	8,3	14,2	10,8	23485	8,1	13,9	13,4
	10	23043	9,6	7,4	4,2	20600	9,1	9,6	7,4
	5	21677	10,6	3,4	2,4	18985	10,4	4,6	3,8
	1	17778	13,1	0,6	1,2	15496	13,7	0,8	1,6
	0,5	15913	14,4	0,3	0,7	13887	15,5	0,5	1,4
	0,1	11665	18,2	0,2	0,7	10217	19,8	0,3	1,3
21	25	9452	19,7	4,8	5,5	9592	20,0	6,4	7,4
	10	7504	22,3	4,2	3,2	7584	22,7	4,7	4,3
	5	6323	24,1	2,5	2,1	6398	24,6	2,6	2,5
	1	3867	27,4	0,8	1,1	4016	29,8	0,7	1,2
	0,5	3011	28,8	0,7	1,1	3163	31,4	0,5	1,1
	0,1	1703	30,7	0,4	1,1	1723	33,4	0,5	1,1
37	25	2668	30,2	1,6	1,9	2504	31,4	2,0	2,9
	10	1773	31,4	1,2	1,9	1650	32,1	1,3	2,3
	5	1277	32,3	1,0	1,9	1159	32,7	1,0	2,2
	1	639	32,3	0,6	2,0	542	33,5	0,6	2,5
	0,5	492	30,6	0,5	2,1	398	32,2	0,6	2,9
	0,1	304	26,8	1,3	6,4	209	27,4	0,6	4,9
54	25	727	27,2	0,9	2,0	590	27,1	0,8	1,9
	10	467	25,9	0,8	1,9	379	25,4	0,7	2,2
	5	333	25,4	0,6	2,0	258	24,7	0,6	2,0
	1	151	23,2	0,3	2,7	106	23,9	0,3	2,9
	0,5	117	21,2	0,3	3,6	97	22,4	0,3	3,5
	0,1	83	18,7	0,3	5,1	76	19,2	0,2	4,8

Apêndice 4.2: Resultados módulo dinâmico e ângulo de fase para a mistura AMP 60/85

Temp. (°C)	Frequência (Hz)	Quente				Morno			
		E*  (MPa)	$\varphi$ (°)	Se( $\sigma$ )	Se( $\epsilon$ )	E*  (MPa)	$\varphi$ (°)	Se( $\sigma$ )	Se( $\epsilon$ )
-10	25	35780	2,5	11,5	8,2	29790	2,4	10,8	6,6
	10	36825	3,3	13,7	9,3	28096	4,3	11,9	5,2
	5	35938	3,4	9,3	6,6	27358	4,9	7,2	4,4
	1	33125	4,9	2,1	3,3	26242	6,3	1,4	3,1
	0,5	31898	5,6	1,3	2,6	24899	6,0	0,9	3,1
	0,1	28198	7,6	1,3	2,4	22487	7,4	1,6	3,4
4	25	33621	7,4	4,6	11,3	21566	7,8	7,7	4,9
	10	29309	8,8	9,2	6,4	19615	9,7	10,8	6,2
	5	27278	10,0	4,7	4,2	18723	10,6	4,7	3,7
	1	22556	13,0	0,8	1,3	15635	13,9	0,8	2,2
	0,5	20899	13,9	0,5	1,1	14038	15,6	0,6	1,7
	0,1	15550	17,7	0,5	1,2	10489	19,4	1,4	1,8
21	25	9653	21,7	4,6	4,3	10402	21,6	7,2	7,4
	10	7469	24,0	4,4	3,4	8585	24,9	4,7	3,3
	5	6253	25,9	2,4	2,1	7184	26,9	2,4	1,9
	1	3824	30,1	0,7	1,0	4306	31,9	0,6	1,0
	0,5	2959	32,3	0,5	1,0	3286	33,1	0,5	0,9
	0,1	1602	31,6	0,5	2,1	1716	33,8	0,6	1,7
37	25	2085	30,2	1,9	2,0	2495	32,9	1,5	2,8
	10	1314	30,3	1,3	2,1	1599	31,1	0,8	1,7
	5	1004	28,5	0,8	1,9	1197	29,8	0,7	1,6
	1	540	24,8	0,4	3,1	604	27,2	0,4	1,9
	0,5	458	21,9	0,4	4,5	506	24,0	0,4	3,2
	0,1	338	15,8	0,4	3,7	330	18,5	0,7	6,8
54	25	460	22,2	0,5	2,0	580	23,5	0,9	4,1
	10	332	18,8	0,6	2,1	414	21,1	0,7	4,5
	5	270	17,2	0,4	1,9	326	19,2	0,6	5,1
	1	191	13,6	0,3	3,1	206	16,4	0,5	6,1
	0,5	180	11,9	0,3	4,5	201	10,7	0,4	5,7
	0,1	138	11,8	0,2	3,7	126	8,0	0,3	6,3

Apêndice 4.3: Resultados módulo dinâmico e ângulo de fase para a mistura CAP 50/70

Temp. (°C)	Frequência (Hz)	Quente				Morno			
		$ E^* $ (MPa)	$\varphi$ (°)	Se( $\sigma$ )	Se( $\epsilon$ )	$ E^* $ (MPa)	$\varphi$ (°)	Se( $\sigma$ )	Se( $\epsilon$ )
-10	25	27859	3,1	10,9	4,0	29425	2,4	11,7	4,6
	10	27252	3,7	11,8	6,3	26958	3,2	14,0	3,8
	5	29152	3,7	9,4	4,6	25981	3,8	8,6	4,1
	1	28050	4,2	2,1	2,5	23387	4,9	1,7	5,0
	0,5	26679	4,6	1,2	2,8	26577	5,5	1,0	5,2
	0,1	26883	5,9	0,5	2,5	23668	6,5	0,4	4,8
4	25	22920	6,6	9,1	6,6	22714	6,2	13,5	9,5
	10	22929	8,7	8,7	4,2	20693	9,2	8,4	3,8
	5	22169	9,3	3,9	2,5	19811	10,0	3,9	3,1
	1	18875	11,5	0,7	1,5	16578	12,2	0,7	3,2
	0,5	17170	13,8	0,4	1,2	14984	14,4	0,4	2,9
	0,1	13401	16,8	0,3	0,9	11308	18,6	0,3	2,5
21	25	12291	19,4	5,7	4,3	11810	20,5	7,7	7,8
	10	10231	22,9	6,1	3,3	9542	24,1	5,3	3,4
	5	8699	25,2	3,1	1,9	7993	26,7	2,9	3,0
	1	5337	31,4	0,9	1,1	4776	32,8	0,9	1,5
	0,5	4106	33,9	0,8	1,0	3590	34,5	0,8	1,5
	0,1	2005	36,4	0,5	1,3	1726	35,9	0,4	2,0
37	25	2738	37,2	1,7	1,7	2754	37,9	2,2	3,9
	10	1625	38,2	1,2	1,6	1667	38,3	1,2	2,3
	5	1129	37,5	0,7	1,2	1132	38,1	0,8	2,2
	1	455	35,2	0,4	1,4	485	33,5	0,6	4,8
	0,5	348	31,0	0,4	2,2	337	29,0	0,5	4,4
	0,1	201	21,0	0,4	3,1	207	21,1	0,7	7,0
54	25	429	30,4	0,5	1,9	438	27,9	0,5	2,0
	10	265	26,3	0,4	1,5	270	24,9	0,5	1,8
	5	187	24,9	0,3	1,6	187	22,0	0,5	1,8
	1	95	20,2	0,3	2,6	95	19,7	0,3	2,8
	0,5	65	17,9	0,3	2,8	69	19,0	0,3	4,1
	0,1	48	11,0	0,2	3,9	59	16,5	0,3	6,2

Apêndice 4.4: Resultados módulo dinâmico e ângulo de fase para a mistura CAP TLA

Temp. (°C)	Frequência (Hz)	Quente				Morno			
		E*  (MPa)	$\varphi$ (°)	Se( $\sigma$ )	Se( $\epsilon$ )	E*  (MPa)	$\varphi$ (°)	Se( $\sigma$ )	Se( $\epsilon$ )
-10	25	44033	2,3	8,6	6,8	40461	2,6	10,1	6,9
	10	42224	2,7	12,1	6,0	40494	2,8	12,4	6,5
	5	41471	3,0	9,3	4,6	40840	3,0	8,7	4,4
	1	40550	3,8	2,3	2,3	37660	4,2	1,8	1,3
	0,5	38930	4,4	1,4	2,3	36491	4,6	1,1	1,0
	0,1	35187	5,4	0,6	2,1	33131	5,7	0,4	0,8
4	25	35764	5,0	13,8	10,8	33254	5,2	11,9	7,6
	10	32499	6,1	8,7	5,1	29678	6,8	11,3	5,6
	5	31123	6,8	4,2	3,2	27885	7,7	6,3	3,0
	1	27618	8,7	0,7	2,2	24359	9,6	1,1	1,1
	0,5	25676	9,7	0,4	2,1	22354	10,7	0,6	0,9
	0,1	20871	12,3	0,2	1,7	17908	14,1	0,3	0,9
21	25	19181	13,1	8,7	8,1	18419	14,7	6,7	5,5
	10	15897	15,4	6,7	4,1	15245	17,2	5,6	2,8
	5	14192	17,1	3,4	1,9	13407	19,2	3,0	1,6
	1	10516	22,0	0,6	0,7	9513	25,0	0,6	0,7
	0,5	8796	24,4	0,5	0,6	7791	27,3	0,5	0,6
	0,1	5484	28,9	0,5	0,8	4546	32,7	0,5	0,8
37	25	7138	26,1	4,2	2,9	6466	30,0	3,7	3,7
	10	5026	29,6	3,5	2,4	4395	33,7	3,0	2,7
	5	3848	31,9	2,1	1,9	3197	35,9	1,9	2,2
	1	1959	35,6	0,8	1,4	1470	38,7	0,7	2,0
	0,5	1448	35,5	0,6	1,4	1024	38,3	0,6	1,9
	0,1	716	32,6	1,1	3,2	494	32,6	0,7	3,0
54	25	1673	33,6	1,5	2,1	1196	35,3	1,0	2,0
	10	1015	33,8	0,9	1,7	692	34,7	0,8	1,7
	5	691	33,8	0,8	1,7	488	34,3	0,6	2,1
	1	239	35,6	0,5	2,8	205	31,3	0,4	2,4
	0,5	170	34,1	0,6	2,7	153	30,2	0,3	2,6
	0,1	73	29,5	1,2	8,2	80	24,5	0,3	3,3